

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL BODIESEL DE SOYA  
COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACION DE EMULSION  
INVERSA**

**OSCAR LEONARDO MUÑOZ HERNÁNDEZ  
JORGE LUIS MANRIQUE CARDENAS**

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

**2012**

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL BODIESEL DE SOYA  
COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACION DE EMULSION  
INVERSA**

**OSCAR LEONARDO MUÑOZ HERNÁNDEZ  
JORGE LUIS MANRIQUE CARDENAS**

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

**Director**

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

**Codirectores**

**Ing. OSCAR FERNANDO LOPEZ SILVA  
Téc. ALEXANDER BELTRAN BARRERA**

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

**2012**

*A DIOS por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

*A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

*A mi hermano, por su compañía, lo quiero mucho.*

*A mis abuelos por quererme y ayudarme siempre, esto también se lo debo a ustedes.*

*A mis amigos con quienes nos colaboramos mutuamente en nuestra formación profesional.*

*A todos aquellos que de una u otra manera fueron de gran apoyo, este logro también es de ustedes.*

*OSCAR LEONARDO MUÑOZ HERNÁNDEZ*

*A DIOS por estar siempre presente en cada una de las decisiones tomadas a lo largo de mi vida, por mostrarme siempre el mejor camino, por protegerme de todo lo malo, por proporcionar mi buena salud y la de mi familia y por permitirme alcanzar este logro tan importante en mi vida.*

*A mis padres por enseñarme los valores, la ética y los principios que me han formado como persona, por estar cuando más los he necesitado, por su apoyo y amor incondicional y por ser la base de mi vida.*

*A cada uno de mis hermanos por brindarme ese amor familiar e incondicionalidad, a mi hermana mayor por ser mi segunda madre y apoyarme siempre a largo de este camino.*

*A las personas que estuvieron presentes en mi vida universitaria porque de cada una aprendí cosas diferentes que me ayudaron a integrar el criterio que hoy día tengo.*

*A la Universidad Industrial de Santander por permitirme formar como profesional y brindarme espacios de cultura, lenguaje y aprendizaje constante.*

*A mí por ser tan paciente y alegre, lo cual me permitió aprovechar y aprender lo mejor de cada experiencia para formarme como la persona íntegra que hoy en día soy.*

*JORGE LUIS MANRIQUE CARDENAS*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresamos nuestros agradecimientos a:

Al Ingeniero Emiliano Ariza León que con su experiencia, valiosos aportes, muy buenos consejos y curiosidad por la investigación permitió la realización de este proyecto.

A la empresa Advanced Organic Materials S.A, por la donación de las muestras de Biodiesel de soya.

A laboratorios QMax Solutions Colombia, por la donación de los aditivos para la preparación de los lodos.

A la escuela de ingeniería de petróleos de la Universidad Industrial De Santander, por permitirnos utilizar el laboratorio de lodos y de fluidos, especialmente a Alex Beltrán, por compartir con nosotros su experiencia y brindarnos su colaboración en el uso del laboratorio, como también en el préstamo de equipos e instrumentos.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	25
1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN	27
1.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS	27
1.1.1 Densidad	27
1.1.2 Reología	27
1.1.2.1 Modelos Reológicos	32
1.1.3. Perdida de filtrado	36
1.1.4. El pH	38
1.1.5. Alcalinidad	38
1.1.6. Lubricidad	39
1.1.7. Porcentaje de Líquidos y Sólidos	39
1.1.8. Estabilidad de la emulsión	40
1.2. FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN	41
1.2.1. Remoción de los recortes del pozo	41
1.2.2. Control de las presiones de la formación	41
1.2.3. Suspensión y descarga de recortes	42
1.2.4. Obturación de las formaciones permeables	43
1.2.5. Mantenimiento de la estabilidad del hueco	44
1.2.6. Minimización de los daños a la formación	45
1.2.7. Enfriamiento, lubricación y sostenimiento de la broca	46
1.2.8. Transmisión de la energía hidráulica a las herramientas y a la broca	46
1.2.9.. Asegurar la evaluación adecuada de la formación	48
1.2.10. Control de la corrosión	49
1.2.11. Facilitar la cementación y el completamiento	49
1.2.12. Minimizar el impacto sobre el medio ambiente	50

1.3. FASES DE LOS LODOS DE PERFORACION	51
1.3.1. Fase continúa de los lodos	51
1.3.2. Fase discontinua de los lodos	51
1.3.3. Fase sólida de los lodos	52
1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	53
1.4.1. Aire / Gas	53
1.4.2. Lodos Base Agua	54
1.4.2.1. Lodos No-Dispersos	54
1.4.2.2. Lodos Dispersos	54
1.4.2.3. Lodos Cálcidos	54
1.4.2.4. Lodos Bajos en Sólidos	55
1.4.2.5. Lodos Salinos (base agua saturada con sal)	55
1.4.3. Lodos Espumosos	55
1.4.4. Lodos Propuestos Como Alternativa A Los Fluidos Neumáticos	55
1.4.5 Lodos Base Aceite	56
1.4.5.1. Teoría De Las Emulsiones Inversas	58
1.4.5.2. Evolución de los lodos de emulsión inversa	64
1.4.5.3. Aplicaciones de lodos base aceite	65
1.4.5.4. Ventajas y desventajas de lodos base aceite	65
1.4.5.5. Componentes Del Lodo Base Aceite	66
1.4.5.5.1. El aceite y sus características	66
1.4.5.5.2. Agua	67
1.4.5.5.3. Emulsificante	67
1.4.5.5.4. Controlador de filtrado	69
1.4.5.5.5. Viscosificante	69
1.4.5.5.6. Densificante	69
1.4.5.5.7. Inhibidores de corrosión	69
1.4.5.5.8. Secuestrante de Oxigeno	69
1.4.5.5.9. Fuente de Alcalinidad	69
1.4.5.5.10. Fuente de Salinidad	70

1.4.5.5.11. Agentes humectantes	70
1.4.6. Lodos De Emulsión Inversa	70
1.4.6.1. Sistema de emulsión firme	70
1.4.6.2. Sistemas de filtrado relajado (FR)	71
1.4.6.3. Sistemas aceite 100%	71
1.4.6.4. Sistemas con alto contenido de agua	71
1.4.7. Preparación De Lodos De Emulsión Inversa	72
2. BODIESEL DE SOYA	74
2.1. HABA DE SOYA	75
2.1.1. Extracción del aceite	76
2.2. La Cadena Productiva Del Biodiesel De Soya	78
2.3. LA PLANTA DE BODIESEL	81
2.4. CARACTERISTICAS DEL BODIESEL DE SOYA	84
2.5. ASPECTO AMBIENTAL	85
2.5.1. Aceites esterificados utilizados como fase continua	91
2.6. PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE DIESEL Y BODIESEL	96
2.7. PROBLEMAS DEL BODIESEL FRENTE AL DIESEL	97
2.7.1. Incompatibilidad a bajas temperaturas	97
2.7.2. Mayor Viscosidad	97
2.7.3. Ataque al Cu y Pb	97
2.7.4. Presencia de Medio Microbiano	97
3. FORMULACIÓN DE LODOS DE EMULSIÓN INVERSA USANDO BODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINUA	99
3.1. REFERENCIAS SOBRE EL USO DE SUSTITUTOS DE LA FASE CONTINUA EN LODOS DE EMULSIÓN INVERSA	100
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	103
3.2.1. Diferentes Tipos De Variables En El Diseño De Un Experimento	106
3.2.1.1. Variable independiente	106

3.2.1.2. Variable dependiente.	106
3.2.1.3. Variables extrañas.	106
3.2.1.4. Variable de bloqueo.	107
3.3. PRUEBAS PRELIMINARES DEL BIODIESEL DE SOYA	112
3.3.1. Caracterización Del Diesel y Biodiesel	112
3.3.2. Pruebas de compatibilidad con los aditivos comunes de los fluidos de emulsión inversa.	114
3.4. PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS.	118
3.4.1. Formulaciones con Diesel y Biodiesel De Soya	119
3.4.2. Pruebas	122
3.4.2.1. Prueba de Reología.	122
3.4.2.2. Densidad Balanza de Lodos Baroid	123
3.4.2.3. Prueba de Filtrado APAT (Alta Presión / Alta Temperatura)	123
3.4.2.4. Análisis de Retorta.	123
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	128
4.1. ANÁLISIS DE DATOS EN EL PROGRAMA ESTADÍSTICO STATGRAPHICS PLUS 5.1	128
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	137
4.3. ANALISIS DE RESULTADOS	171
5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL BIODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINUA EN LODOS PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA	178
6. CONCLUSIONES	190
7. RECOMENDACIONES	193
BIBLIOGRAFIA	195
ANEXOS	198

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas del uso de lodos base aceite.	66
Tabla 2. Tipos de lodos base aceite.	72
Tabla 3. Características Principales Biodiesel Soya	84
Tabla 4. Características de los Aceites Esterificados	94
Tabla 5. Pruebas de Toxicidad, Aceite Vegetal	95
Tabla 6. Pruebas de Biodegradabilidad, Aceite Vegetal	95
Tabla 7. Diseño Experimental Factibilidad Técnica y Económica Del Uso Del Biodiesel de Soya Como Fase Continúa En Lodos De Perforación De Emulsión Inversa.	109
Tabla 8. Resultados De Las Pruebas Preliminares.	112
Tabla 9. Viscosidad Cinemática del Biodiesel Soya y Diesel No.2 a diferentes temperaturas	113
Tabla 10. Cantidades de cada aditivo agregado al Biodiesel De Soya	117
Tabla 11. Resultados de la prueba de compatibilidad	118
Tabla 12 Formulación de Emulsión Firme 9 lpg	120
Tabla 13 Formulación de Filtrado relajado 9 lpg	120
Tabla 14 Formulación de Alto Contenido de agua 9 lpg	121
Tabla 15 Formulación de 100 % Aceite 9 lpg	121
Tabla 16 Corrección Formulación Biodiesel de Soya de Alto Contenido de Agua Relación: 50/50 O/W 9 lpg	122
Tabla 17 Corrección Formulación de Alto Contenido de agua Relación: 40/60 O/W 9 lpg	122
Tabla 18. Resultado de Pruebas con Diesel	124
Tabla 19. Resultado De Pruebas con Biodiesel De Soya	126
Tabla 20. Resumen Estadístico	133
Tabla 21 Análisis de Varianza (ANOVA)	134
Tabla 22. Medias (con 95,0 de intervalos LSD)	135

Tabla 23. Contraste De Varianza	135
Tabla 24. VALORES P	136
Tabla 25. Reología de la Formulación 100 % Aceite	137
Tabla 26. Propiedades de la Formulación 100 % Aceite	137
Tabla 27. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación 100 % Aceite	141
Tabla 28. Reología de la Formulación de emulsión firme 80/20	144
Tabla 29. Propiedades de la Formulación Emulsión firme 80/20	144
Tabla 30. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Emulsión firme 80/20	147
Tabla 31. Reología de la Formulación de Emulsión Firme 70/30	147
Tabla 32 Propiedades de la Formulación de Emulsión Firme 70/30	147
Tabla 33. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Emulsión firme 70/30	150
Tabla 34. Reología de la Formulación Filtrado relajado 80/20	153
Tabla 35 Propiedades de la Formulación Filtrado relajado 80/20	153
Tabla 36. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Filtrado relajado 80/20	156
Tabla 37. Reología de la Formulación de Filtrado relajado 70/30	156
Tabla 38 Propiedades de la Formulación de Filtrado relajado 70/30	156
Tabla 39. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Filtrado relajado 70/30	158
Tabla 40. Reología de Formulación Alto % Agua 50/50	162
Tabla 41 Propiedades de la Formulación de Alto % Agua 50/50	162
Tabla 42. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación de Alto % Agua 50/50	164
Tabla 43. Reología de Formulación de Formulación Alto % Agua 40/60	165
Tabla 44 Propiedades de Formulación de Formulación Alto % Agua 40/60	165
Tabla 45. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Alto % Agua 40/60	167

Tabla 46. Costo Por Barril Emulsión Inversa 70/30 O/W.	
Fase continua Diesel No. 2	178
Tabla 47. Costo Por Barril Emulsión Inversa 70/30 O/W.	
Fase continua Biodiesel de Soya	178
Tabla 48. Costos de Producción del Biodiesel De Soya	182
Tabla 49. Costos Generados Por El Lodo Base Aceite - Fase continua Diesel	186
Tabla 50. Costos Generados Por El Lodo Base Aceite - Fase continua Biodiesel de Soya	186
Tabla 51. Costos comparativos para el sistema fase continua Aceite Diesel / Biodiesel de Soya	187

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Tipos de Geles	31
Figura 2. Clasificación De Los Modelos Reológicos	33
Figura 3. Esquema de la filtración.	37
Figura 4. Gotas de agua dispersas en aceite. (Emulsión inversa)	59
Figura 5. Coalescencia de las gotas de agua mal emulsionadas.	62
Figura 6. Disposición del emulsificante alrededor de una gota de agua.	68
Figura 7. Habas o Semillas de soya	76
Figura 8. Proceso de extracción de aceite y producción de harina a partir de haba de soya.	77
Figura 9. La Cadena Productiva Del Biodiesel De Soya.	79
Figura 10. Proceso De Producción Del Biodiesel De Soya.	82
Figura 11. Emisión de gases de combustión usando biodiesel Puro de Soya	86
Figura 12. Emisión de gases de combustión usando biodiesel Soya mezclado en un 20% con Diesel.	86
Figura 13. Variación de la viscosidad Cinemática del Biodiesel y el Diesel No.2 a diferentes temperaturas	114
Figura 14. Pruebas de Compatibilidad	117
Figura 15. Resumen Del Procedimiento Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya	129
Figura 16. Resumen Estadístico Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya	129
Figura 17. Tabla ANOVA Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya.	130
Figura 18. Tabla De Medias Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya.	131
Figura 19: Contraste de Varianza Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya	131

Figura 20. LSD (least significant difference),	132
Figura 21: Grafico de Dispersión según muestra de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya	132
Figura 22: Gráfico de Cajas y Bigotes según formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya	133
Figura 23. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite	138
Figura 24. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite	139
Figura 25. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte 100 % Aceite	139
Figura 26. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Emulsión firme 80/20	145
Figura 27. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Emulsión firme 80/20	145
Figura 28. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Emulsión firme 80/20	146
Figura 29. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación de Emulsión Firme 70/30	148
Figura 30. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Emulsión Firme 70/30	149
Figura 31. Esfuerzo de Corte vs Tasa de Corte Formulación Emulsión Firme 70/30	149
Figura 32. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Filtrado relajado 80/20	154
Figura 33. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Filtrado relajado 80/20	155
Figura 34. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Filtrado relajado 80/20	155
Figura 35. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Filtrado relajado 70/30	157
Figura 36. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Filtrado relajado 70/30	158
Figura 37. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Formulación Filtrado relajado 70/30	158
Figura 38. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación de Alto % Agua 50/50	163

Figura 39. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación de Alto % Agua 50/50	163
Figura 40. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Formulación de Alto % Agua 50/50	164
Figura 41. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Alto % Agua 40/60	166
Figura 42. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Alto % Agua 40/60	166
Figura 43. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Formulación Alto % Agua 40/60	167
Figura 44. Comparación de filtrados HPHT	175
Figura 45. Análisis de Geles	176
Figura 46. Análisis de Retorta	177
Figura 47. Influencia Del Costo Del Aceite Sobre la Viabilidad Del Biodiesel	184
Figura 48. Influencia Del Costo Del Aceite Sobre la Viabilidad Del Biodiesel	185

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Registro fotográfico de las formulaciones preparadas.	199
Anexo B. Cálculos Tipo.	213

## LISTA DE ABREVIATURAS

API American Petroleum Institute.

Bbl Barriles.

°C Grados centígrados.

Ca<sup>++</sup> Ion calcio.

Cl<sup>-</sup> Ion cloro.

cP Centipoise.

cSt Centistokes.

°F Grados Fahrenheit.

ft<sup>2</sup> Pies cuadrados.

g Gramos.

HPHT Filtrado de alta presión y alta temperatura.

k Índice de consistencia.

L Litros.

lpb Libras por barril.

LWD Registro mientras se perfora (Log While Drilling).

lpg Libras por galón.

min Minutos.

ml Mililitros.

MWD Medir mientras se perfora (Measure While Drilling).

n Índice de flujo.

Psi Libras por pulgada cuadrada.

OBM Lodos base aceite

RPM Revoluciones Por Minuto.

seg Segundos.

% V Porcentaje en volumen.

VP Viscosidad Plástica.

YP Punto cedente (Yield Point).

YS Esfuerzo cedente (Yield Stress).

## RESUMEN

**TITULO: FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL BIODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA \***

**AUTORES: OSCAR LEONARDO MUÑOZ HERNÁNDEZ  
JORGE LUIS MANRIQUE CARDENAS \*\***

**PALABRAS CLAVES:** Estudio de factibilidad, Biodegradable, Biodiesel de Soya, Emulsión Inversa.

### DESCRIPCIÓN

En la perforación de pozos con lodos base aceite es común utilizar Diesel como fase continua que genera efectos contaminantes severos al medio ambiente, necesitando de tratamientos costosos para reducir el impacto generado por los desechos sólidos y líquidos. Tomando en consideración la preservación ambiental; este proyecto tiene como propósito fundamental, plantear una nueva opción basada en el estudio de la factibilidad de usar Biodiesel a base de soya como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa, el cual es no tóxico y biodegradable.

El capítulo 1, contiene información concerniente con todas las funciones y tipos de fluidos de perforación. El Capítulo 2, hace referencia al Biodiesel de Soya sus características y aspecto ambiental. El Capítulo 3, describe la propuesta para el uso del Biodiesel de Soya, las pruebas de caracterización del Biodiesel de Soya, el diseño experimental, pruebas de compatibilidad y preparación de las formulaciones. El Capítulo 4, hace referencia al análisis y discusión de los resultados y finalmente el Capítulo 5, correspondiente al análisis de costos del biodiesel de soya.

En los resultados obtenidos se pudo determinar que el Biodiesel De Soya desde el punto de vista técnico es factible emplearlo como fase continua en lodos de emulsión inversa y aunque la viscosidad es mayor que la base Diesel, presenta buenas propiedades para lodos de perforación, además el uso de este genera una reducción del costo en los tratamientos de los desechos.

---

\* Trabajo de Grado

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

## ABSTRACT

**TITLE: TECHNICAL AND ECONOMIC FACTIBILITY ABOUT THE USE OF SOYBEAN BIODIESEL AS CONTINUOUS PHASE IN DRILLING FLUIDS OF INVERSE EMULSION \***

**AUTORS:** OSCAR LEONARDO MUÑOZ HERNÁNDEZ  
JORGE LUIS MANRIQUE CARDENAS \*\*

**KEYWORDS:** Study of Factibility, Biodegradable, Biodiesel of soybean, Inverse Emulsion.

### DESCRIPTION

In drilling with oil based mud is common to use Diesel as continuous phase generates severe pollution effects the environment, requiring expensive treatment to reduce the impact generated solid and liquid wastes. Considering environmental preservation; this project has as its fundamental purpose, to raise a new option based on the study of the factibility of using soybean based biodiesel as continuous phase in drilling fluids of inverse emulsion, which is non-toxic and biodegradable.

The chapter 1 contains information pertaining to all functions and types of drilling fluids. The chapter 2 refers to the Soybean Biodiesel characteristics and environmental aspect. The chapter 3 describes the proposal for the use of soybean biodiesel, characterization tests of soybean Biodiesel, experimental design, compatibility testing and preparation of the formulations. The chapter 4 refers to the analysis and discussion of the results and finally the chapter 5, for the cost analysis of soybean Biodiesel.

In the results it was determined that the of soybean biodiesel from the technical viewpoint it is feasible to use it as the continuous phase in invert emulsion muds and though the viscosity is greater than the base Diesel presents good properties for drilling muds, and the using this generates a cost reduction in waste treatment.

---

\* Undergraduate Project

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

## INTRODUCCIÓN

El empleo de lodos base de aceite (OBM) en el campo petrolero se generalizó en el año 1942. Los primeros fluidos externos al petróleo estaban compuestos básicamente por asfalto y combustible diesel. Estos lodos ayudaron en las operaciones de perforación a estabilizar las lutitas sensibles al agua, proporcionaron lubricidad para las operaciones de extracción de núcleos y lograron reducir el daño al yacimiento.

Con el auge de la era de la perforación direccional a finales de la década de 1980, los OBM demostraron poseer una capacidad superior para reducir la fricción entre la columna de perforación y la formación. El esfuerzo de torsión y arrastre se redujeron significativamente con respecto a los niveles observados comúnmente con la utilización de lodos base agua, lo que permitió a los perforadores llegar a mayores distancias y perforar trayectorias más tortuosas.

El diesel es la base predominante de los sistemas de lodo base aceite, aún es utilizado en algunas áreas del mundo a pesar del alto contenido de hidrocarburos aromáticos y a las preocupaciones de HSE (Salud, Seguridad y Medio Ambiente); debido a que puede causar reacciones adversas en la piel, o ser carcinogénico. El contenido aromático (componente cancerígeno) del diesel es de aproximadamente 30% por volumen. También produce vapores peligrosos existiendo el alto riesgo de explosión, además del agravante económico y ambiental que el uso de estos conlleva.

En cualquier proyecto de perforación, los operadores deben lograr un equilibrio que busque minimizar el impacto ambiental, mantener estable el pozo y maximizar la eficiencia de la perforación.

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 estos aceites: En 2002 se realizaron pruebas con aceite de palma, el lodo preparado resultó ser excesivamente viscoso según los análisis de viscosidad, en el 2008 se preparó una formulación base con glicerina dando propiedades reológicas muy altas, en el 2010 se preparó una formulación a base Biodiesel de Palma arrojando resultados favorables.

Desde el año 2001, el empleo de fluidos de perforación no acuosos, tanto a base de aceite como a base de sintéticos, se incrementó en promedio en un 2% por año, tendencia que probablemente se mantenga.

Sin perder de vista que en los últimos años se ha puesto de manifiesto algunas consecuencias para el medio ambiente y las formaciones productoras de hidrocarburos por el manejo no controlado de productos utilizados en las diversas fases de la actividad petrolera.

Con la experiencia de las anteriores investigaciones se decidió estudiar la factibilidad del uso del Biodiesel a base Soya como fluido en la fase continua en lodos de perforación base aceite, un producto natural, no tóxico y biodegradable; realizando una serie de pruebas para evaluar si el comportamiento de sus propiedades está dentro de las especificaciones que debe cumplir un fluido de perforación.

Se busca mediante este proyecto brindar un aporte para el desarrollo de una tecnología limpia, que pretende substituir aceites base diesel por biodiesel a base de soya en lodos de perforación base aceite, que proporcionen más eficiencia, menos costos y por supuesto menor impacto ambiental.

## 1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación pueden definirse como la mezcla de fluidos y sólidos con determinadas características que contribuyen a cumplir con las distintas funciones de los mismos. Su diseño y composición se establecen de acuerdo a las características físico-químicas de las distintas formaciones a perforar. <sup>(5)</sup>

### 1.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

**1.1.1 Densidad.** 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.

La densidad del lodo debe ser controlada continuamente usando la balanza de lodos. <sup>(5)</sup>

**1.1.2 Reología.** Es la ciencia que trata de la deformación y del flujo 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 está 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 fuerzas estáticas de gel para suspender los sólidos cuando se detiene la circulación. <sup>(14)</sup>

- **Viscosidad ( $\mu$ ):** Es el término reológico más conocido. Se define como Esfuerzo cortante de un fluido dividido por la correspondiente velocidad de corte, o  $\mu = \text{Esfuerzo de Corte } (\tau) / \text{Velocidad de Corte } (g)$

En su sentido más amplio, la viscosidad se puede describir como la resistencia interna de un fluido a circular. Define la capacidad del lodo de lograr una buena limpieza del pozo, de mantener en suspensión y desalojar los cortes y de facilitar su decantación en la zaranda.

En el campo petrolífero, los términos a continuación se usan para describir la viscosidad y las propiedades reológicas del fluido de perforación: <sup>(10)</sup>

- **Viscosidad embudo (seg/qt o seg/l):** El tiempo requerido para que una muestra de lodo fluya a través de un embudo Marsh es una prueba rápida de la consistencia de un fluido de perforación. La prueba consiste básicamente en llenar el Embudo con una muestra de lodo y entonces medir el tiempo requerido para que un cuarto de galón de la muestra fluya del embudo inicialmente lleno a la copa de lodo. La viscosidad de embudo (viscosidad marsh) está dada en segundos por cuarto de galón (s/qt). El agua tiene una viscosidad de embudo o marsh de 26 s/qt. <sup>(10)</sup>
- **Viscosidad efectiva (cP o mPa.seg):** La viscosidad de un fluido no newtoniano cambia con el esfuerzo de corte. La viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ) de un fluido es la viscosidad de un fluido bajo condiciones específicas. Estas condiciones incluyen la velocidad de corte, la geometría por donde fluye el fluido, la presión y la temperatura. <sup>(10)</sup>

- **Viscosidad aparente (cP o mPa.seg):** La viscosidad aparente está indicada por la indicación del viscosímetro de lodo a 300 RPM ( $\theta 300$ ) o la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM ( $\theta 600$ ).<sup>(10)</sup>

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.

$$Va = \theta 600/2$$

- **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.<sup>(10)</sup>

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

La viscosidad plástica es afectada principalmente por:

1. La concentración de sólidos.
2. El tamaño y la forma de los sólidos.
3. La viscosidad de la fase fluida.
4. La presencia de algunos polímeros de cadena larga
5. Las relaciones aceite-agua (A/A) o Sintético-Agua (S/A) en los fluidos de emulsión inversa.

- **Punto cedente- Yield Point (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 las superficies de las

partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo las condiciones de flujo, y depende de: <sup>(10)</sup>

1. Las propiedades de la superficie de los sólidos contenidos en el lodo,
2. La concentración en volumen de estos sólidos,
3. El ambiente iónico del líquido que rodea los sólidos

yield point se mide en lb/100 ft<sup>2</sup> y se calcula con la siguiente ecuación:

$$YP = 0300 - VP$$

- 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. <sup>(5)</sup>

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.

El esfuerzo cedente se mide en lb/100 ft<sup>2</sup> y se calcula con la siguiente ecuación:

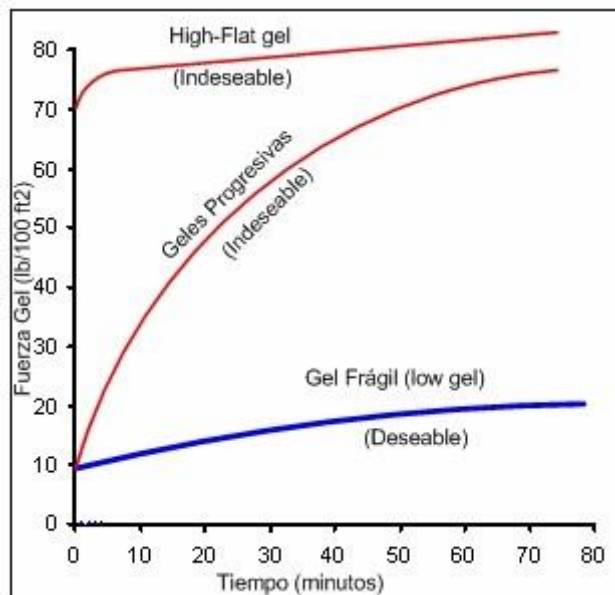
$$YS = (2 \times 03) - 06$$

- Esfuerzos de gel: Las fuerzas gel a 10 segundos y 10 minutos se miden con el viscosímetro Fann (VG meter), esta fuerza gel indica las fuerzas de atracción (gelación) de las partículas de un fluido de perforación bajo condiciones estáticas. Una excesiva gelación es el resultado de una alta concentración de sólidos, lo que lleva a la floculación del lodo (consecuencia

indeseable pues esto causaría un aumento de viscosidad, gelificación y filtrado).<sup>(10)</sup>

Signos de problemas con las propiedades reológicas del lodo a menudo son reflejados por el excesivo desarrollo de la fuerza gel del lodo. Cuando existe un amplio rango entre el gel inicial y el de 10 minutos, estas son llamadas “geles progresivas” (esta no es una situación deseable, pues la fuerza para iniciar el movimiento será cada vez mayor). Si el gel inicial y el de 10 minutos son ambos altos, sin una diferencia apreciable entre ellos, estos se denominan “High-flat Gels” (también indeseables). No debe permitirse que la gelación adquiera un valor mas alto de lo necesario para ejecutar las funciones de suspensión de recortes y material densificante. Para la suspensión, la condición de gel frágil es deseable, como se indica en la figura 1.

**Figura 1. Tipos de Geles**



Fuente. Manual de fluidos M-I & SWACO

Excesivos valores de la fuerza gel son causados por altas concentraciones de sólidos y pueden causar los siguientes problemas en la perforación:<sup>(10)</sup>

1. Pistoneo, cuando se saca sarta del pozo,
2. Surgencia, cuando se introduce la sarta en el pozo,
3. Dificultad para introducir herramientas de registro en el fondo del pozo,
4. Retención de gas o aire atrapado en el lodo, y
5. Retención de arena y recortes mientras se perfora.

**1.1.2.1 Modelos Reológicos <sup>(9)</sup>:** La medición de los fluidos de perforación y el monitoreo de sus propiedades reológicas nos permite determinar la capacidad de limpieza, su poder para levantar los sólidos de la perforación y analizar el comportamiento de sus propiedades cuando están presentes contaminantes, sustancias químicas y los cambios de temperatura.

Las propiedades del lodo durante las operaciones de perforación deben ser controladas con el fin de asegurar un desempeño adecuado, sobre todo las asociadas a sus propiedades de flujo, específicamente las de reología básica, asociadas a las relaciones tensión de corte- velocidad de corte.

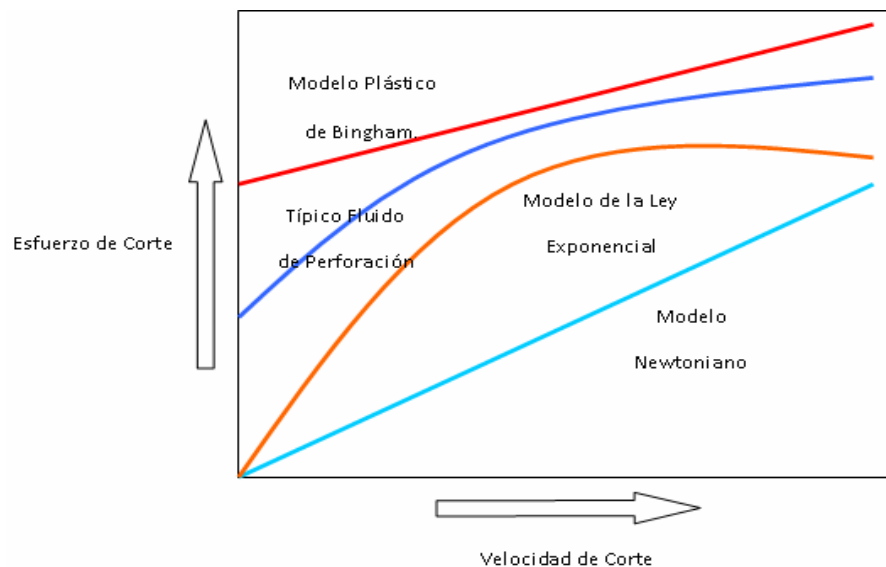
La graficación de esta relación para un fluido dado recibe el nombre de reograma. En estos reogramas se observan las diferencias existentes entre los fluidos Newtonianos y los no Newtonianos. De aquí se observa que, la relación está dada por una curva y no por una línea recta, y el fluido exhibe una tensión de cedencia. Como la viscosidad es definida como la tensión de corte dividida por la velocidad de corte, se puede diferenciar que el reograma perteneciente a un fluido no Newtoniano, la viscosidad no es constante con respecto a la velocidad de corte, tal como ocurre para los fluidos Newtonianos.

Con el fin de determinar exactamente los reogramas de los fluidos de perforación no Newtonianos, es necesario el uso de un viscosímetro FANN. No existen ecuaciones matemáticas que reproduzcan la reología de los lodos en su totalidad, pero se han propuesto ciertas ecuaciones que en cierta manera se aproximan a las

complejas relaciones entre tensión de corte y la velocidad de corte. Estas ecuaciones reciben el nombre de modelos reológicos. En esta sección se consideran tres de ellos:

- El Modelo Plástico de Bingham
- La Ley Exponencial
- La Ley Exponencial Modificada

**Figura 2. Clasificación De Los Modelos Reológicos**



Fuente. Manual de fluidos de Baroid

### **El Modelo Plástico de Bingham <sup>(9)</sup>**

Es el modelo más utilizado en el campo, y en el tratamiento del lodo por su simplicidad. Este modelo se apoya en los datos suministrados por el uso de un viscosímetro FANN, y las lecturas en su dial a 600 RPM y 300 RPM, estas lecturas se grafican en coordenadas rectangulares y se unen en una línea recta, la cual viene dada por el valor de la pendiente y su corte con la ordenada en el origen.

Los parámetros considerados en este modelo son la viscosidad plástica (VP) y el punto de cedencia (PC). Estos valores se determinan fácilmente de las lecturas en el dial del viscosímetro FANN, F600 y F300 a 600 y 300 revoluciones por minuto respectivamente, las ecuaciones viene dada por:

$$VP = F600 - F300$$

$$PC = F300 - VP$$

El viscosímetro utilizado es diseñado de manera que las unidades en estas ecuaciones vengan dadas para la VP en centipoise y el punto cedente en lb/100 pies<sup>2</sup>.

La ecuación de la recta antes mencionada que describe el modelo puede expresarse en términos de los parámetros señalados:

$$F = PC + (VP/300) R$$

Donde PC representa el corte con el eje vertical y VP representa la pendiente de la recta.

### **La Ley Exponencial** <sup>(9)</sup>

El estudio del punto cedente y la viscosidad plástica han demostrado ser los parámetros más importantes para determinar el comportamiento de los lodos, y en los cuales puede basarse su tratamiento. El Modelo Plástico de Bingham presenta algunas imprecisiones, sobre todo a bajas velocidades de corte, donde los valores sobre las tensiones exceden a veces las verdaderas tensiones de corte verificadas en los lodos.

La Ley Exponencial logra disminuir el inconveniente a bajas velocidades de corte del modelo de Bingham. En lugar de graficar en coordenadas rectangulares los datos de las lecturas a 300 y 600 rpm del viscosímetro, se grafican estas, en un papel log-log y de esta manera obtener una línea recta que pasa muy cerca de los puntos restantes, representándolos con una menor incertidumbre con respecto a los valores reales.

En la grafica de papel log-log se obtiene una curva exponencial, con una ecuación algebraica de forma:

$$F = K * R^n$$

Este modelo es conocido como la ley exponencial, sus parámetros son n y K.

El parámetro n es el índice de comportamiento del flujo laminar.

Para un fluido Newtoniano  $n = 1$ ; para los lodos de perforación es siempre menor a 1. Cuanto más bajo sea el valor de n, menos Newtoniano es el fluido.

El parámetro K es el factor de consistencia del flujo laminar. Se le considera como similar a la viscosidad plástica dado que un aumento de K significará un aumento en la concentración de sólidos o disminución en el tamaño de las partículas. Para mantener los valores de K bajos es necesario un control de sólidos eficiente o la dilución del fluido de perforación.

### **Ley Exponencial Modificada**<sup>(9)</sup>

La ley exponencial modificada es realizada con el fin de tomar en consideración la tensión de cedencia (cierto grado de resistencia interna que debe ser vencida para que un lodo empiece a fluir). La ley exponencial modificada es similar a la ley exponencial, exepcto que toma en cuenta una tensión de cedencia positiva, (Go).

Con el uso de un viscosímetro en el laboratorio,  $G_0$  debe tomarse como la lectura estable de 3 revoluciones por minuto. La ley Exponencial modificada viene dada por la ecuación:

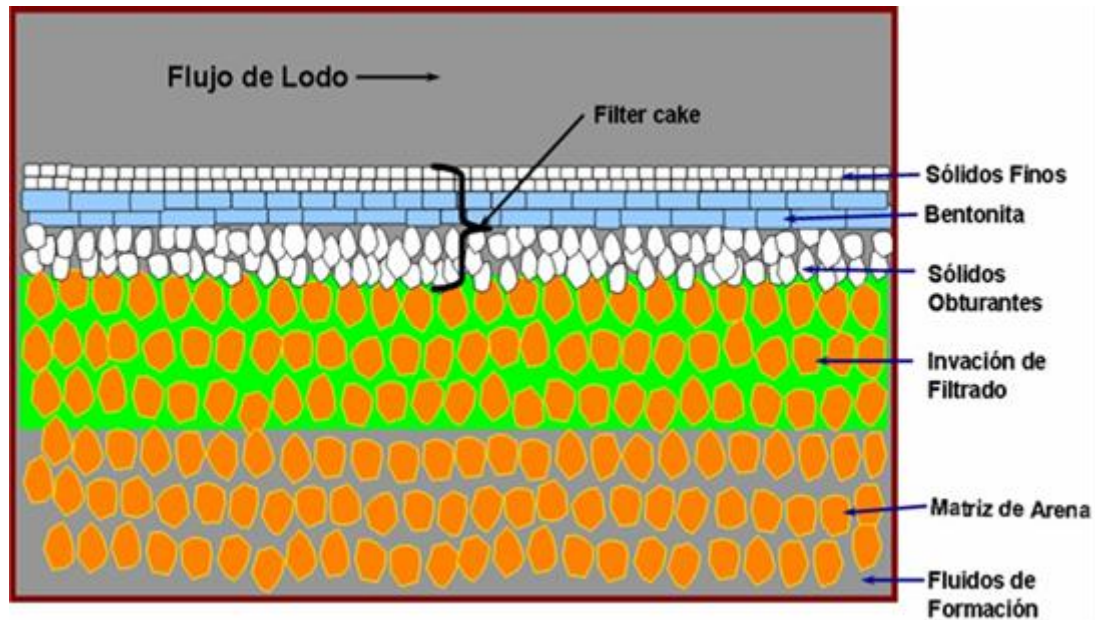
$$F = G_0 + K \cdot R^n$$

Como ocurre en la ley exponencial, de donde es parcialmente fundamentada la Ley Exponencial Modificada,  $n$  es una medida de la capacidad del fluido para reducir la viscosidad por efectos de corte y  $K$  es una medida del contenido de sólidos. Estos valores raramente son iguales para las dos leyes exponenciales.

La Ley Exponencial Modificada es un modelo un poco más complejo pero es la que describe de manera más eficaz el comportamiento reológico de la mayoría de los lodos

**1.1.3. Perdida de filtrado** <sup>(14)</sup>. 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 una torta (Figura 3). 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 la torta (cake) y contribuirán al control de filtración. <sup>(14)</sup>

Figura 3. Esquema de la filtración.



Fuente. Manual de fluidos M-I & SWACO

Para que la filtración pueda ocurrir, tres condiciones son necesarias.<sup>(10)</sup>

1. Debe haber un líquido o un fluido líquido/lechada de sólidos.
2. Debe haber un medio permeable.
3. La presión del fluido debe ser más alta que la presión del medio permeable.

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 distribución de los sólidos.

Se tienen varios métodos para determinar el filtrado de un fluido de perforación el filtrado API a presiones moderadas, presión (100 psi) y temperatura ambiente. El filtrado de alta presión alta temperatura “HPHT”

“HPHT” a condiciones de 500 psi y 250 °F o más, el filtrado a “PPT” (Prueba de taponamiento de permeabilidad) a condiciones de 1000 psi o más y 250°F o mas y el FANN 90 que es una filtración dinámica a alta presión y alta temperatura.

**1.1.4 El pH.** El potencial de hidrógenos (pH) es un valor que oscila entre 0 y 14, y proporciona el grado de alcalinidad o acidez de una sustancia, siendo los valores más bajos indicadores de acidez y los más altos, de alcalinidad. Comúnmente los lodos de perforación deben ser alcalinos, presentando valores de pH entre 8 y 13, esto con el objetivo de prevenir corrosión de la tubería, preservar productos orgánicos en el lodo y mantener las propiedades reológicas del mismo.

**1.1.5 Alcalinidad.** La alcalinidad es el poder ácido neutralizante de una sustancia. La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de los iones solubles en agua que pueden neutralizar ácido, además, de indicar la concentración de iones oxidrilos (OH<sup>-</sup>) en exceso en una solución acuosa.

En un lodo, la prueba debe realizarse directamente en él (Pm) o en el filtrado (Mf y Pf).

Los resultados obtenidos nos brindan una estimación de la concentración de los iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en el lodo, que son los directos responsables de la alcalinidad del filtrado y del lodo. <sup>(9)</sup>

La alcalinidad de un lodo base aceite se determina rompiendo la emulsión y analizando el volumen de la mezcla hasta su punto final. El número de cc de ácido sulfúrico utilizado en la titulación es reportado como alcalinidad del lodo. <sup>(9)</sup>

**1.1.6 Lubricidad.** La lubricidad se define como la habilidad del mismo para lubricar la sarta de perforación en el pozo o la disminución de la resistencia friccional de la sarta a la rotación y al movimiento vertical de esta dentro del hoyo (torque y arrastre respectivamente), incrementando la vida útil de las mechas y sartas. Su mejoramiento e implementación en el lodo resulta de gran importancia para las operaciones de perforación. <sup>(9)</sup>

La fricción puede ser experimentada entre superficies metálicas (sarta y revestimiento) y entre la sarta de perforación y las paredes del hueco, cada una presenta características diferentes y por consiguiente se requieren lubricantes específicos. Una deficiente lubricidad ocasiona problemas de atascamiento de sarta y una reducción de la vida útil de la mecha de perforación entre otros. Mientras una buena lubricidad incrementa la eficiencia de la mecha, reduce el torque en la sarta durante la perforación direccional y disminuye velocidades de tuberías en el pozo y fuerza de aprisionamiento. En todo lodo de perforación es importante una buena lubricidad, ya que, de esta propiedad depende, la lubricación de las tuberías de perforación.

Para evaluar en el laboratorio la lubricidad de un lodo se utiliza un equipo especial medidor de lubricidad llamado Lubricity Tester que puede simular la rotación de la tubería bajo las condiciones de presión a las que se encuentra sometida en el pozo.

**1.1.7 Porcentaje de Líquidos y Sólidos.** Para determinar la cantidad de líquidos y sólidos en un fluido de perforación se requiere el uso de una retorta. Una muestra es colocada en una cámara de acero de un volumen determinado y se calienta

vaporizando los componentes líquidos. Los vapores pasan a través de una unidad condensadora y el líquido o condensado es recolectado en un cilindro graduado, calibrado en porcentaje, el volumen del líquido se mide en porcentaje y todos los sólidos, ya sean los suspendidos o los disueltos, se determinan por diferencia.

El análisis de retorta de un lodo base aceite puede requerir más tiempo que el de un lodo base agua. Las sales disueltas en la porción del lodo permanecerán en la retorta como sólidos. El análisis de retorta es usado como una guía para controlar la relación aceite/agua y el contenido de sólidos del lodo base aceite.

Para calcular la relación aceite/agua  $R(O/W)$  es necesario determinar el porcentaje por volumen de aceite y agua presente en el lodo. <sup>(9)</sup>

**1.1.8 Estabilidad de la emulsión.** La Estabilidad Eléctrica (ES) constituye una indicación relativa de la estabilidad de la emulsión. Se trata de una medida del 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 se registra en voltios. Varios factores principales afectan la estabilidad eléctrica: contenido de agua, sólidos humectados por agua, emulsificación, temperatura y tipo de sólidos. <sup>(5)</sup>

## 1.2. FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN <sup>(14)</sup>

Las funciones del fluido de perforación describen las tareas que el fluido de perforación es capaz de desempeñar, aunque algunas de éstas no sean esenciales en cada pozo. La remoción de los recortes del pozo y el control de las presiones de la formación son funciones sumamente importantes. Aunque el orden de importancia sea determinado por las condiciones del pozo y las operaciones en curso, las funciones más comunes del fluido de perforación son las mencionadas a continuación:

**1.2.1 Remoción de los recortes del pozo.** Los recortes de perforación deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la broca. Con este fin, se hace circular un fluido de perforación dentro de la columna de perforación y a través de la broca, el cual arrastra y transporta los recortes hasta la superficie, subiendo por el espacio anular. La remoción de los recortes (limpieza del pozo) depende del tamaño, forma y densidad de los recortes, unidos a la velocidad de penetración (ROP); de la rotación de la columna de perforación; y de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido de perforación. <sup>(14)</sup>

**1.2.2 Control de las presiones de la formación.** Como se mencionó anteriormente, una función básica del fluido de perforación es controlar las presiones de la formación para garantizar una operación de perforación segura.

Típicamente, a medida que la presión de la formación aumenta, se aumenta la densidad del fluido de perforación agregando barita para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad del pozo. Esto impide que los fluidos de formación fluyan hacia el pozo y que los fluidos de formación 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 de

la columna de fluido de perforación es igual o superior a la presión de la formación, los fluidos de la formación no fluirán dentro del pozo.

Mantener un pozo “bajo control” se describe frecuentemente como un conjunto de condiciones bajo las cuales ningún fluido de la formación fluye dentro del pozo. Pero esto también incluye situaciones en las cuales se permite que los fluidos de la formación fluyan dentro del pozo bajo condiciones controladas. Dichas condiciones varían de los casos en que se toleran altos niveles de gas de fondo durante la perforación, a situaciones en que el pozo produce cantidades comerciales de petróleo y gas mientras se está perforando.

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.<sup>(14)</sup>

**1.2.3 Suspensión y descarga de recortes.** Los lodos de perforación deben suspender los recortes de perforación, los materiales densificantes y los aditivos bajo una amplia variedad de condiciones, sin embargo deben permitir la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos.

Los recortes de perforación que se sedimentan durante condiciones estáticas pueden causar puentes y rellenos, los cuales, por su parte, pueden producir el atascamiento de la tubería o la pérdida de circulación.

El material densificante que se sedimenta constituye un asentamiento y causa grandes variaciones de la densidad del fluido del pozo. El asentamiento ocurre con mayor frecuencia bajo condiciones dinámicas en los pozos de alto ángulo donde el fluido está circulando a bajas velocidades anulares.

Las altas concentraciones de sólidos de perforación son perjudiciales para prácticamente cada aspecto de la operación de perforación, principalmente la eficacia de la perforación y la velocidad de penetración (ROP). Estas concentraciones aumentan el peso y la viscosidad del lodo, produciendo mayores costos de mantenimiento y una mayor necesidad de dilución.

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

Se debe mantener un equilibrio entre 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 que el equipo de remoción de sólidos suele funcionar más eficazmente con fluidos de viscosidad más baja. El equipo de control de sólidos no es tan eficaz con los fluidos de perforación que no disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte, los cuales tienen un alto contenido de sólidos y una alta viscosidad plástica.<sup>(14)</sup>

**1.2.4 Obturación de las formaciones permeables.** La permeabilidad se refiere a la capacidad de los fluidos de circular a través de formaciones porosas; las formaciones deben ser permeables para que los hidrocarburos puedan ser producidos.

Cuando la presión de la columna de lodo es más alta que la presión de la formación, el filtrado invade la formación y un revoque se deposita en la pared del pozo. Los sistemas de fluido de perforación deberían estar diseñados para depositar sobre la formación un delgado revoque de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión de filtrado. Esto mejora la estabilidad del pozo y evita numerosos problemas de perforación y producción. Los posibles problemas

relacionados con un grueso revoque y la filtración excesiva incluyen las condiciones de pozo “reducido”, registros de mala calidad, mayor torque y arrastre, tuberías atascadas, pérdida de circulación, y daños a la formación.

Según el sistema de fluido de perforación que se use, varios aditivos pueden ser aplicados para mejorar el revoque, limitando la filtración. Estos incluyen la bentonita, los polímeros naturales y sintéticos, el asfalto y la gilsonita, y los aditivos desfloculantes orgánicos.<sup>(14)</sup>

**1.2.5 Mantenimiento de la estabilidad del hueco.** La estabilidad del pozo constituye un equilibrio complejo de factores mecánicos (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.

Independientemente de la composición química del fluido y otros factores, el peso del lodo debe estar comprendido dentro del intervalo necesario para equilibrar las fuerzas mecánicas que actúan sobre el pozo (presión de la formación, esfuerzos del pozo relacionados con la orientación y la tectónica). La inestabilidad del pozo suele ser indicada por el derrumbe de la formación, causando condiciones de agujero reducido, puentes y relleno durante las maniobras. Esto requiere generalmente el ensanchamiento del pozo hasta la profundidad original. (Se debe tener en cuenta que estos mismos síntomas también indican problemas de limpieza del agujero en pozos de alto ángulo y pozos difíciles de limpiar).

La mejor estabilidad del pozo se obtiene cuando éste mantiene su tamaño y su forma cilíndrica original. Al desgastarse o ensancharse de cualquier manera, el pozo se hace más débil y es más difícil de estabilizar.<sup>(14)</sup>

**1.2.6 Minimización de los daños a la formación.** 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 presión del yacimiento al pozo).

Algunos de los 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 del 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 daños a la formación 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.<sup>(14)</sup>

**1.2.7 Enfriamiento, lubricación y sostenimiento de la broca y del conjunto 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. La circulación del fluido de perforación enfría la broca y el conjunto de perforación, alejando este calor de la fuente y distribuyéndolo en todo el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la columna de perforación hasta temperaturas más bajas que la temperatura de fondo. Además de enfriar, el fluido de perforación lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor generado por fricción.

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 en particular es medida por su Coeficiente de Fricción (COF), y algunos lodos proporcionan una lubricación más eficaz que otros.

Por ejemplo, los lodos base de 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. <sup>(14)</sup>

**1.2.8 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 o 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 (ID), 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. <sup>(14)</sup>

**1.2.9. 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.

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 importante. Si el núcleo será usado para estudios de inyección de agua y/o humectabilidad, será necesario usar un 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 de aceite con una cantidad 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.<sup>(14)</sup>

**1.2.10. Control de la 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 elastómeros.

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 se está usando el inhibidor químico correcto y si la cantidad es suficiente. Esto mantendrá la velocidad de corrosión a un nivel aceptable. <sup>(14)</sup>

**1.2.11. 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. <sup>(14)</sup>

**1.2.12. 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. <sup>(14)</sup>

### 1.3 FASES DE LOS LODOS DE PERFORACION <sup>(9)</sup>

Un lodo es, típicamente, una suspensión de sólidos y posiblemente también de líquidos o gases, en un líquido. El líquido en el cual todos estos materiales están suspendidos es la fase continua del lodo. Las partículas sólidas o glóbulos líquidos en él suspendidos constituyen la fase discontinua del lodo. Por ejemplo, el agua es la fase continua y la arcilla la fase discontinua (interna) en un lodo de agua y arcilla. En una emulsión inversa el petróleo es la fase continua; los glóbulos de agua son la fase discontinua.

Hay razones para que distingamos esas fases. La razón principal para la viscosidad de un lodo hay que buscarle en la fase continua. Un aumento en la concentración de la fase continua, mientras que el revoque se forma a partir de la fase discontinua.

La fase continua de un lodo es siempre líquida. En cambio, en la fase discontinua se pueden hallar sólidos, líquidos y/o gases.

**1.3.1 Fase continúa de los lodos.** La constituye el elemento que mantendrá en suspensión o reaccionará con los diferentes aditivos que constituyen las otras fases. Esta fase generalmente es agua dulce, pero también puede ser agua salada o una emulsión de agua petróleo. La densidad de esta fase influirá en la densidad final del fluido, por consiguiente debe conocerse la gravedad específica del agua y la gravedad API del petróleo. <sup>(9)</sup>

**1.3.2 Fase discontinua de los lodos.** Los glóbulos de petróleo emulsionados en un lodo de base agua, viscosifican el lodo y reducen su densidad. El petróleo del lodo puede originarse en las formaciones perforadas. Más a menudo, cuando se encuentran cantidades significativas de petróleo en un lodo de base agua, se trata de petróleo añadido deliberadamente para reducir la fricción mecánica, para reducir la filtración a través de las paredes, para liberar una tubería aprisionada por presión

diferencial o, en casos poco frecuentes, para producir un lodo más liviano que el agua.

El agua emulsionada en un lodo de base aceite, lo hace más viscoso. La proporción aceite/agua en un lodo de base aceite debe ser cuidadosamente controlada. La entrada de agua de formación en este tipo de lodo lo hace más viscoso y, si es suficientemente abundante, lo desestabiliza.

El aire o el gas que penetran y se distribuyen en un lodo provocan su espesamiento y una disminución de su densidad (debido a la compresibilidad de los gases, la reducción de la densidad en el pozo no es igual a la que puede parecer en superficie). Algo de aire penetra inevitablemente en el lodo como consecuencia de las operaciones de superficie (mezcla, conexiones, etc.). También las formaciones perforadas pueden liberar gas en el lodo.

Algunos sólidos atraen moléculas de líquido provenientes de la fase continua. La bentonita por ejemplo, se hidrata en lodos de agua dulce hasta alcanzar un volumen que es aproximadamente 10 veces el que tenía en estado seco. Esta “agua rígida” entra a hacer parte de la fase discontinua y explica en parte, la eficacia de la bentonita como emulsificante.<sup>(9)</sup>

**1.3.3 Fase sólida de los lodos.** Los sólidos desempeñan un papel tan importante en la condición y mantenimiento de un lodo que les asignamos una fase aparte, aun cuando todas las partículas sólidas que hay en un lodo pertenecen a su fase discontinua. La inestabilidad de un lodo aumenta a medida que el porcentaje de sólidos (en volumen) se eleva. El tratamiento químico puede incrementar la capacidad de un lodo para tolerar sólidos, pero solo hasta cierto punto. Muchos problemas de los lodos son causados por el fracaso en controlar los sólidos en forma adecuada.

Los sólidos que se hidratan o tienen numerosas cargas eléctricas de superficie expuestas, se denominan sólidos activos en los lodos de base agua. Otros sólidos, como por ejemplo la barita, son completamente inertes. La mayoría de los sólidos son inertes en lodos base aceite. Un lodo cuyo nivel total de sólidos no es excesivo puede, sin embargo, contener un exceso de sólidos activos.

La velocidad de penetración decrece a medida que aumenta el número de partículas sólidas en un lodo. El efecto de los sólidos sobre la estabilidad del lodo ya se ha mencionado. Por consiguiente, un sólido es deseable solamente en el caso de que su contribución positiva a las propiedades del lodo sea tan grande como para justificar su presencia. Esto significa que el sólido debe ser extraordinariamente eficiente en la contribución que hace al proceso. La barita y la bentonita, si se usan en forma apropiada, satisfacen ese criterio. Los sólidos de perforación generalmente no lo satisfacen. Por consiguiente, los sólidos de perforación son indeseables y deben ser eliminados del lodo. <sup>(9)</sup>

#### **1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN <sup>(19)</sup>**

Según las características del terreno a perforar, profundidad final, disponibilidad, costos, cuidado del ambiente, entre otros, es seleccionado el fluido y sus aditivos para que satisfaga las necesidades operacionales.

Una forma simple en la que podemos agrupar los fluidos de perforación, puede ser la siguiente:

**1.4.1 Aire / Gas.** 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

rata 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. Utilizado para perforar formaciones duras y secas o para combatir pérdidas de circulación. Rara vez se utiliza costa afuera, con la excepción de pozos de bajo balance o en perforación con tubería flexible o de producción.

#### **1.4.2 Lodos Base Agua <sup>(19)</sup>**

Los tipos principales sistemas de lodos base agua, son:

- No-Dispersos
- Dispersos
- Calados ó Cálcidos
- Polímeros
- Bajos en Sólidos
- Salinos (Saturados en Sal)

**1.4.2.1. Lodos No-Dispersos** Generalmente incluyen lodos de poco peso ligeramente tratados y lodos de inicio. No tiene adición de adelgazantes. Usualmente empleados para perforar las secciones de tope del agujero y pozos poco profundos.

**1.4.2.2. Lodos Dispersos.** Para profundidades en incremento y pesos de lodo mayores, las formulaciones de lodo requieren aditivos dispersantes (lingosulfonatos, lignitos y taninos) para cancelar las fuerzas atractivas entre partículas que crean viscosidad en el lodo base agua. Esto extiende efectivamente el uso del sistema de lodos hasta que tenga que ser reemplazado.

**1.4.2.3. Lodos Cálcidos.** Típicamente este grupo incluiría los lodos base yeso-lignito y lodos base calcio. En este punto se adicionará en exceso una fuente de

calcio (yeso, cal) para asegurar un constante suministro de iones de calcio que es efectivo para desacelerar el proceso de hidratación de las lutitas. Este lodo tiende a ser relativamente barato de operar y las prácticas de desechado y dilución son la norma para el control final de sólidos.

**1.4.2.4. Lodos Bajos en Sólidos.** Estos son por lo general lodos base polímero diseñados para tener un máximo del 6% al 10% de contenido de sólidos por volumen.

**1.4.2.5. Lodos Salinos (base agua saturada con sal).** Estos incluirían los sistemas poliméricos con base de agua saturada con sal y con agua de mar, en donde otros polímeros agregados proveen viscosidad y las propiedades para control de pérdida de fluido.

**1.4.3. Lodos Espumosos.** Fabricados mediante la inyección de agua y agentes espumantes dentro de una corriente de aire o gas creando un 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, tienen el propósito de reducir la cabeza hidrostática y prevenir pérdidas de circulación en zonas de baja presión, además de incrementar la rata de penetración.

**1.4.4. Lodos Propuestos Como Alternativa A Los Fluidos Neumáticos.** Este tipo de lodos se utiliza en donde las técnicas de perforación, de bajo balance de presión (underbalance) tienen gran aplicación, es así que se ha propuesto un sistema de lodos que han sido probados en el campo con éxito y que se constituyen en una buena alternativa al uso de fluidos neumáticos, pues con ellos:

- Se puede 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.

Como con los fluidos neumáticos, con estos nuevos lodos se pueden lograr tasas de perforación altas y disminuir los daños de formación y las pérdidas de circulación. La reducción de densidad en lodos convencionales incluso puede 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 3,000 psi de resistencia al colapso) de fácil remoción y reciclables.

**1.4.5 Lodos Base Aceite** <sup>(18)</sup>. 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 (lignosulfatos, 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 °F 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 menciona anteriormente un punto de anilina de 135 °F 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.

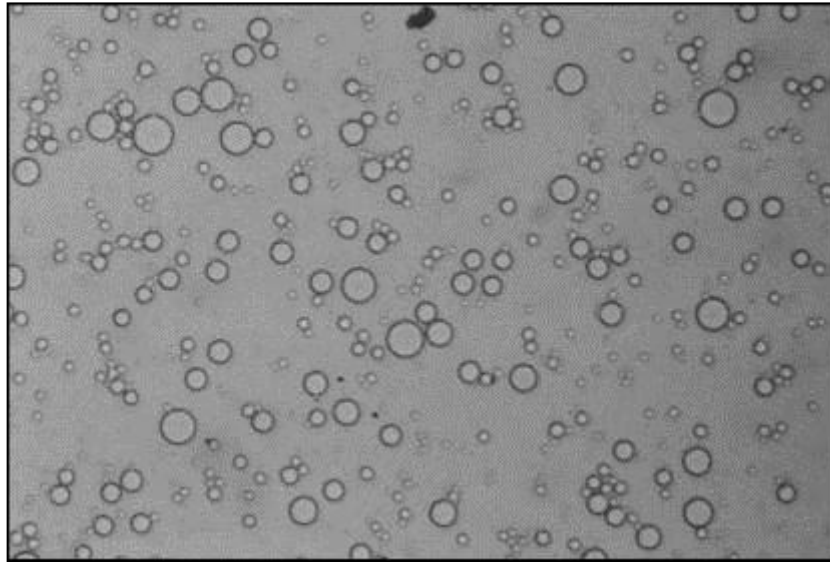
Los lodos salados también se pueden convertir pero a causa de su difícil emulsificación con aceite, se deben tratar previa o simultáneamente con aditivos especiales para emulsiones de agua salada.

Las propiedades de estos lodos son principalmente influenciadas por:

- Relación agua/aceite: a mayor cantidad de agua, más grande será la gota dispersa y mayor la probabilidad de chocarse y coalescer, la cantidad de agua agregada a un lodo base aceite puede alcanzar un 40%.
- Tiempo e intensidad de agitación: una agitación fuerte fortalece la emulsión y ayuda a disminuir el tamaño y dispersar las gotas.
- Contenido de sólidos: un exceso de sólidos puede producir secamiento del aceite. El aceite se impregna sobre la superficie del sólido o se absorbe por las partículas oleofílicas, lo que origina una disminución en la concentración de aceite libre y una reducción de los espacios que separan las microgotas de agua facilitándoles su encuentro y coalescencia.
- Concentración y tipo de emulsificante: un buen emulsificante disminuye la tensión interfacial y asegura una dispersión prolongada.
- Presión y temperatura de fondo: genera cambios en las propiedades reológicas de la emulsión y pueden tener efectos adversos para su estabilidad.

**1.4.5.1. Teoría De Las Emulsiones Inversas** <sup>(18)</sup>. Una emulsión inversa es una emulsión de agua en aceite en la cual la fase dispersa es agua dulce o salada y la fase continua es diesel, petróleo o alguna otra clase de aceite Figura 4.

**Figura 4. Gotas de agua dispersas en aceite. (Emulsión inversa)**



Fuente. Manual de fluidos M-I & SWACO

Una emulsión se define como una dispersión de partículas finas de un líquido en otro líquido. Para una emulsión inversa o lodo verdadero de base petróleo, el agua salada está dispersa en gotas pequeñas dentro de una fase continua de petróleo. Las gotitas se llaman la fase dispersa. El petróleo es la fase continua porque el petróleo es la fase externa que rodea las gotitas de agua en una emulsión inversa.

Una emulsión de agua en petróleo se estabiliza por medio de varios emulsificantes. En una buena emulsión no debe haber tendencia de separación de las fases. El petróleo continuará siendo la fase continua y las gotas de agua no serán capaces de abrirse paso en medio de esa fase continua o de entrar en contacto con las paredes del pozo o con la sarta.

Las teorías modernas que tratan de la formación y conductas de las emulsiones son complejas y no hay una teoría que por sí sola explique todas las características importantes de comportamiento. Se conoce sin embargo que la conducta de una

emulsión inversa es influida considerablemente por la relación petróleo-agua, por el tiempo y grado de agitación, y por el tipo y cantidad de emulsificantes empleados.

Las gotitas de agua actúan como visosificantes y contribuyen sustancialmente a la resistencia de gel, al control de filtrado y a la suspensión de la barita. Gotitas emulsionadas más pequeñas dan como resultado una mayor viscosidad, mejor suspensión del densificante y menor pérdida de filtrado (característica importante de todos los lodos base aceite).

La mayoría de los lodos de emulsión inversa se emplean en condiciones cercanas a una relación óptima entre las cantidades de petróleo y de agua. Esta proporción petróleo-agua está planificada para que el lodo tenga el mejor equilibrio entre viscosidad, pérdida de filtrado y estabilidad de la emulsión.

La tendencia en la tecnología actual de perforación es emplear lodos con relaciones petróleo-agua más altas que las que se usaban antes. Hay varias razones para esto, pero las tres principales son: mejoramiento de la perforación, mejor estabilidad térmica y mayor resistencia a la contaminación.

Con el menor contenido en agua de estos sistemas de elevada relación petróleo/agua, las funciones normalmente cumplidas por el agua deben ser realizadas por aditivos suplementarios que han sido especialmente desarrollados con ese propósito. Entre ellos se incluyen viscosificantes, suspensores de viscosificante y aditivos de control de filtrado.

Los jabones han sido usados como agentes emulsificantes desde hace mucho tiempo. Los jabones de sodio entre otros iones monovalentes se usan para formar emulsiones de petróleo en agua. Para las emulsiones inversas son utilizados jabones de calcio los cuales tienen dos grandes grupos terminales orgánicos ligados al ión central bivalente (calcio), que es soluble en agua. Estas

moléculas de jabones cálcicos se doblen a través de la interfase petróleo-agua y dan por resultado emulsiones inversas. Cuando se incluye un electrolito en la fase acuosa, la solubilidad del calcio de la molécula de jabón cálcico aumenta. Por esa razón, las emulsiones inversas más estables se forman cuando la fase acuosa contiene un electrolito, como el cloruro de sodio (NaCl) o el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ).

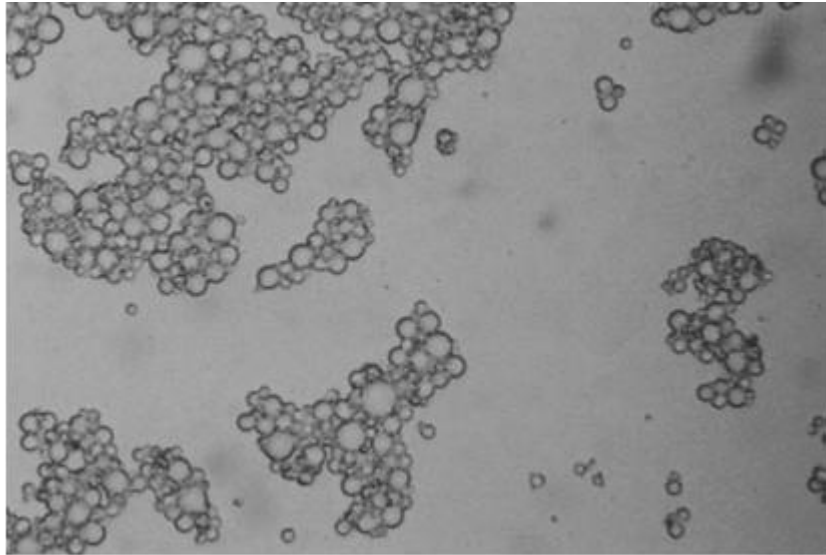
Durante la agitación inicial, el agua es fraccionada en pequeñas gotitas y dispersada dentro de la fase continua de aceite. Una agitación intensa produce gotitas más pequeñas y una emulsión más densa.

En una emulsión, la enorme cantidad de gotas causa un aumento de la viscosidad y actúa básicamente como los sólidos finos agregados a un lodo base agua, aumentando la viscosidad plástica.

Para emulsificar correctamente el agua en aceite, debe haber suficiente emulsificante químico que forme una película alrededor de cada gota de agua. La emulsión será inestable si no hay suficiente emulsificante. A medida que el contenido de agua aumenta, la concentración requerida de emulsificante aumenta.

Desde el punto de vista de la estabilidad, cuanto más pequeña sea la gota, más estable será la emulsión, ya que las gotas más grandes se fusionan más fácilmente que las gotas más pequeñas (ver la Figura 5).

**Figura 5. Coalescencia de las gotas de agua mal emulsionadas.**



Fuente. Manual de fluidos M-I & SWACO

El tamaño uniforme de las gotas también hace que la emulsión sea más estable. Para obtener pequeñas gotas de tamaño uniforme, se debe aplicar una energía o un esfuerzo en la forma de esfuerzo de corte.

Las pequeñas gotas uniformes de agua generan viscosidad y esfuerzos de gel que ayudan a soportar el material densificante y reducen el filtrado al quedar atrapadas en el revoque.

Cuando se aumenta el contenido de agua (fase interna) de una emulsión inversa:

- El tamaño de las gotas de agua aumenta.
- Las posibilidades de que las gotas de agua se fusionen aumenta
- La viscosidad plástica de la emulsión aumenta.
- La cantidad de emulsificante requerida para formar una emulsión estable aumenta.
- La estabilidad de la emulsión disminuye.

Cuando se agrega aceite (fase continua), la emulsión se hace más estable por la distancia entre las gotas de agua aumenta y la viscosidad disminuye.

Para obtener la viscosidad, el esfuerzo de gel y el control de filtración deseados, la relación de aceite a agua debe ser equilibrada para satisfacer las necesidades específicas.

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 equipo 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) <sup>1</sup> 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 emulsificante. reológicas y fisicoquímicas.

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.

---

<sup>1</sup> Manual de lodos Baroid

**1.4.5.2. Evolución de los lodos de emulsión inversa <sup>(4)</sup>.** 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 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 tenemos<sup>2</sup>:

- Ester: Elaborado por la reacción de un ácido graso con un alcohol.
- Di-Eter: Hecho de la condensación y oxidación parcial de alcoholes.

---

<sup>2</sup> ADC/SPE 27450

- 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.

#### **1.4.5.3. Aplicaciones de lodos base aceite <sup>(18)</sup>.**

- Perforación en formaciones profundas las cuales registran temperaturas altas (mayores a 300°F).
- Perforación de formaciones de sal, anhidrita, carnalita, formaciones de arcillas activas, formaciones que contengan H<sub>2</sub>S o CO<sub>2</sub>.
- Perforación en las arenas productoras que pueden ser fácilmente dañadas con el uso de un lodo base agua.
- Perforación direccional donde se presenten problemas por el aumento del torque.

#### **1.4.5.4. Ventajas y desventajas de lodos base aceite. <sup>(18)</sup>**

En la tabla 1 se presenta las principales ventajas y desventajas del uso de lodos base aceite.

**Tabla 1. Ventajas y desventajas del uso de lodos base aceite.**

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

Fuente. RODRIGUEZ B. Eliserio. Guía de laboratorio de lodos y cementos. UIS. Bucaramanga 2007.

**1.4.5.5. Componentes Del Lodo Base Aceite <sup>(4)</sup>.** 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.

**1.4.5.5.1. El aceite y sus características.** El aceite agregado debe poseer las siguientes características: <sup>(4)</sup>

- 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 esterres, éteres, polialfaolefinas y alquilatos detergentes.

Los esterres 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 esterres, pero no son tan polares, son más estables térmicamente y son menos biodegradables.

**1.4.5.5.2. 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 semipermeables ubicada entre ellas.<sup>(14)</sup>

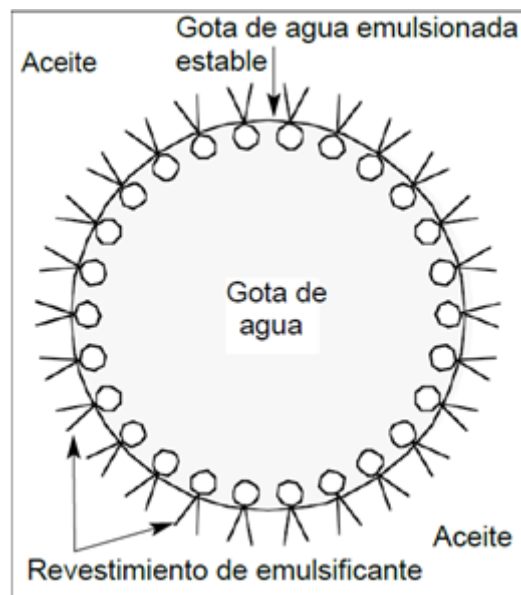
**1.4.5.5.3. Emulsificante.** Para emulsificar el agua en el aceite, debe existir la suficiente cantidad de emulsificante a fin de evitar formar una película alrededor de las gotas de agua previniendo que estas partículas coalescan y cambien la estabilidad de la emulsión. Un tamaño uniforme de las gotas proporcionará que la emulsión se haga más estable, para esto se necesita bastante agitación que pueda ser suministrar 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.

Los emulsificantes son agentes tensioactivos que reducen la tensión superficial entre las gotas de agua y el aceite. Los emulsificantes estabilizan la mezcla al ser parcialmente solubles en agua y parcialmente solubles en aceite. Un extremo de la molécula de emulsificante tiene una afinidad con el agua mientras que el resto de la molécula tiene una afinidad con el aceite o fluido sintético. Las partículas de emulsificante forman un revestimiento alrededor de las gotas de agua para impedir que éstas se fusionen, como se muestra en la Figura 6. Existen emulsificantes principal y secundario. <sup>(14)</sup>

**Figura 6. Disposición del emulsificante alrededor de una gota de agua.**



Fuente. Manual de fluidos M-I & SWACO

**1.4.5.5.4. Controlador de filtrado.** El control de filtración de los lodos de emulsión inversa es afectado por la viscosidad de la fase fluida continua, la relación de aceite a agua, la estabilidad de la emulsión, la humectación por agua de los sólidos, el contenido de sólidos y la cantidad de arcilla tratada con amina en el sistema. Muchos sistemas no requieren aditivos especiales de control de filtración en las formulaciones diseñadas para ser usadas a temperaturas inferiores a 300°F (149 °C). A temperaturas más altas, la mayoría de los sistemas requieren un aditivo de control de filtración. Son utilizados Lignitos organofílicos, Aditivos asfálticos.

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

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

**1.4.5.5.7. 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.

**1.4.5.5.8. 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.

**1.4.5.5.9. Fuente de Alcalinidad.** A fin de evitar problemas de corrosión el lodo debe tener un pH preferencialmente básico, para esto se utiliza la cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

Hasta tener un pH mayor de 9. También hace parte del proceso de saponificación de los emulsionantes.

**1.4.5.5.10. 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  $\text{CaCl}_2$  es más soluble que el  $\text{NaCl}$ , 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  $\text{CaCl}_2$  ofrece al operador la posibilidad de ajustar la salinidad (o actividad) dentro del rango adecuado, mediante adiciones de  $\text{CaCl}_2$  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  $\text{NaCl}$  no lo haría.

**1.4.5.5.11. Agentes humectantes.** Un agente humectante es un agente tensioactivo que reduce la tensión interfacial y el ángulo de contacto entre un líquido y un sólido. Esto hace que el líquido se extienda sobre la superficie del sólido. Los agentes humectantes tienen un extremo que es soluble en el líquido de fase continua y otro que tiene una fuerte afinidad con las superficies de los sólidos.

#### **1.4.6. Lodos De Emulsión Inversa <sup>(11)</sup>**

Los lodos de emulsión inversa (Base aceite) se clasifican en 4 categorías<sup>3</sup>.

**1.4.6.1. Sistema de emulsión firme:** Los sistemas de emulsión firme ofrecen estabilidad a alta temperatura y tolerancia a los contaminantes. Se aplican principalmente a formaciones con altas temperaturas (hasta 500°F). Estos sistemas usan altas concentraciones de emulsificantes y agentes controladores de pérdida de fluido para dar mayor estabilidad a la emulsión y reducir la pérdida de filtrado. El

---

<sup>3</sup> Manual de lodos Baroid

filtrado “HPHT” (alta presión y alta temperatura) es comúnmente menor de 15 ml y debe ser todo aceite.

**1.4.6.2. Sistemas de filtrado relajado (FR):** los sistemas de filtrado relajado no tienen nada o muy bajas concentraciones de emulsificantes y agente controlador de filtrado. El aumento de filtrado de estos sistemas provee velocidades mas rápidas de perforación. El volumen de la pérdida de fluido HPHT es de 15 a 20 ml. Estos sistemas son estables a temperaturas hasta 325 °F. <sup>(11)</sup>

**1.4.6.3. Sistemas aceite 100%:** formulados solo con aceite en la fase continua, usados con frecuencia como fluidos de corazonamiento. Su alta tolerancia a la contaminación por sal y anhídrita, estabilidad a altas temperaturas, alto poder inhibitorio y estabilizador de arcillolitas y valores altos de lubricidad lo perfilan para ser usados en pozos que presenten estos problemas. Este sistema no debe usarse donde existan fuentes de agua que puedan ser contaminadas. <sup>(11)</sup>

**1.4.6.4. Sistemas con alto contenido de agua:** los sistemas de alto porcentaje de agua 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. Estos sistemas que tienen una relación agua aceite 50/50, pueden reducir hasta un 45% el aceite remanente en los recortes. Los sistemas de alto porcentaje de agua no son recomendados a temperaturas superiores 250°F. <sup>(11)</sup>

En la tabla 2, se detalla los usos principales de estos diferentes sistemas.

**Tabla 2. Tipos de lodos base aceite.**

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

Fuente: Manual de fluidos de Baroid.

**1.4.7. Preparación De Lodos De Emulsión Inversa <sup>(18)</sup>.** 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 continuación<sup>4</sup>:

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

Paso 2. En un recipiente separado agregar la sal ( $\text{CaCl}_2$ ) al agua y agitar durante 15 min.

---

<sup>4</sup> Guía De Laboratorio De Lodos y Cementos – Eliserio Rodriguez Bermudez

Paso 3. Agregar el agente emulsificante principal, al aceite (paso 1), y agitar durante mínimo 15 min.

Paso 4. Agregar la salmuera a la muestra anterior, agitar durante mínimo 15 min.

Paso 5. Agregar a la muestra anterior el emulsificante secundario y agitar durante mínimo 15 min.

Paso 6. Agregar a la mezcla anterior la Cal y agitar durante mínimo 15 min.

Paso 7. Agregar el Viscosificante y agitar durante mínimo 15 min.

Paso 8. Agregar el material pesante y agitar durante mínimo 15 min.

## 2. BIODIESEL DE SOYA

El biodiesel de soya es un combustible líquido capaz de reemplazar al Diesel, que se obtiene a partir de aceite vegetal de soya.

Los cultivos energéticos que se utilizan para producir aceite de soya para biodiesel generan también harinas de alto valor proteico, que en muchos casos se utilizan como alimento humano y animal.

Para su producción, el aceite se somete a un proceso químico llamado “transesterificación”, mediante el cual los ácidos grasos que forman las grasas o aceites son separados del glicerol. Para lograr la reacción química necesaria el aceite es refinado y luego mezclado con algún tipo de alcohol (metanol) que en presencia de un catalizador, como puede ser el metóxido de sodio o el hidróxido de potasio rompe la molécula del aceite en ésteres metílicos (el nombre químico del biodiesel) y glicerol, un valioso subproducto generalmente usado en jabones y como precursor en la industria química. El biodiesel puede usarse en su forma pura (B100) o mezclado en cualquier proporción con diesel regular para su uso en motores de ignición a compresión (los llamados motores diesel), los cuales no requieren ninguna modificación.

El biodiesel posee lo que se conoce como “ciclo cerrado del carbono”, lo que significa que el CO<sub>2</sub> liberado a la atmósfera cuando se consume biodiesel se recicla con el crecimiento de las mismas plantas que serán utilizadas posteriormente para volver a producirlo.

Optar por biodiesel en lugar de diesel común implica toda una serie de beneficios tanto ambientales como económicos. Este combustible es

biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos potencialmente cancerígenos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilicen en la transesterificación.

Desde el punto de vista económico, su producción es el eslabón que mayor valor agregado tiene dentro de la cadena productiva. Además, de la producción de biodiesel derivan subproductos, como la glicerina, que pueden reutilizarse y comercializarse de manera rentable. <sup>(15)</sup>

## **2.1. HABA DE SOYA <sup>(15)</sup>**

Es uno de los productos que predomina dentro del comercio de semillas oleaginosas, aceites vegetales y harinas proteínicas, debido a las características agronómicas favorables, rentabilidades razonables obtenidas por agricultores y procesadores y la producción de aceites comestibles y harinas proteínicas de gran calidad. La soya es un producto alimenticio antiguo en China, Japón y Corea. El principal país productor de soya es Estados Unidos, seguido por Brasil, China, Argentina, Canadá y la India.

Soya es el nombre común de una leguminosa y de las semillas que produce. Se cree que la soya procede del este de China; en la actualidad se cultiva en muchos otros lugares. La planta es erguida, pubescente, de 0,5 a 1,5 m de altura, con grandes hojas trifoliadas (tréboles) , flores pequeñas de color blanco o púrpura y vainas cortas que encierran entre una y cuatro semillas. Cuando la planta alcanza la madurez, entre 100 y 150 días después de la plantación, según la variedad, el lugar y el clima, las hojas viran al amarillo y se caen y las vainas adquieren en poco tiempo color tostado y se secan. Las semillas, casi esféricas, suelen ser de color amarillo claro, y también negro, castaño o verde en ciertas variedades raras. Éstas contienen alrededor de un 20% de aceite.

El contenido de aceite del haba de soya es relativamente bajo, variando entre 17% y 19%; más del 80% del haba consiste en harina proteínica y cáscara. Casi todas las demás semillas oleaginosas tienen un contenido de aceite superior al 30%, cifras que en algunas puede llegar a ser hasta del 64%. Los cultivadores de habas de soya obtienen la mayor parte de sus ingresos de la harina. Incluso cuando los precios del aceite son altos y los de las harinas relativamente bajas.

**Figura 7. Habas o Semillas de soya**

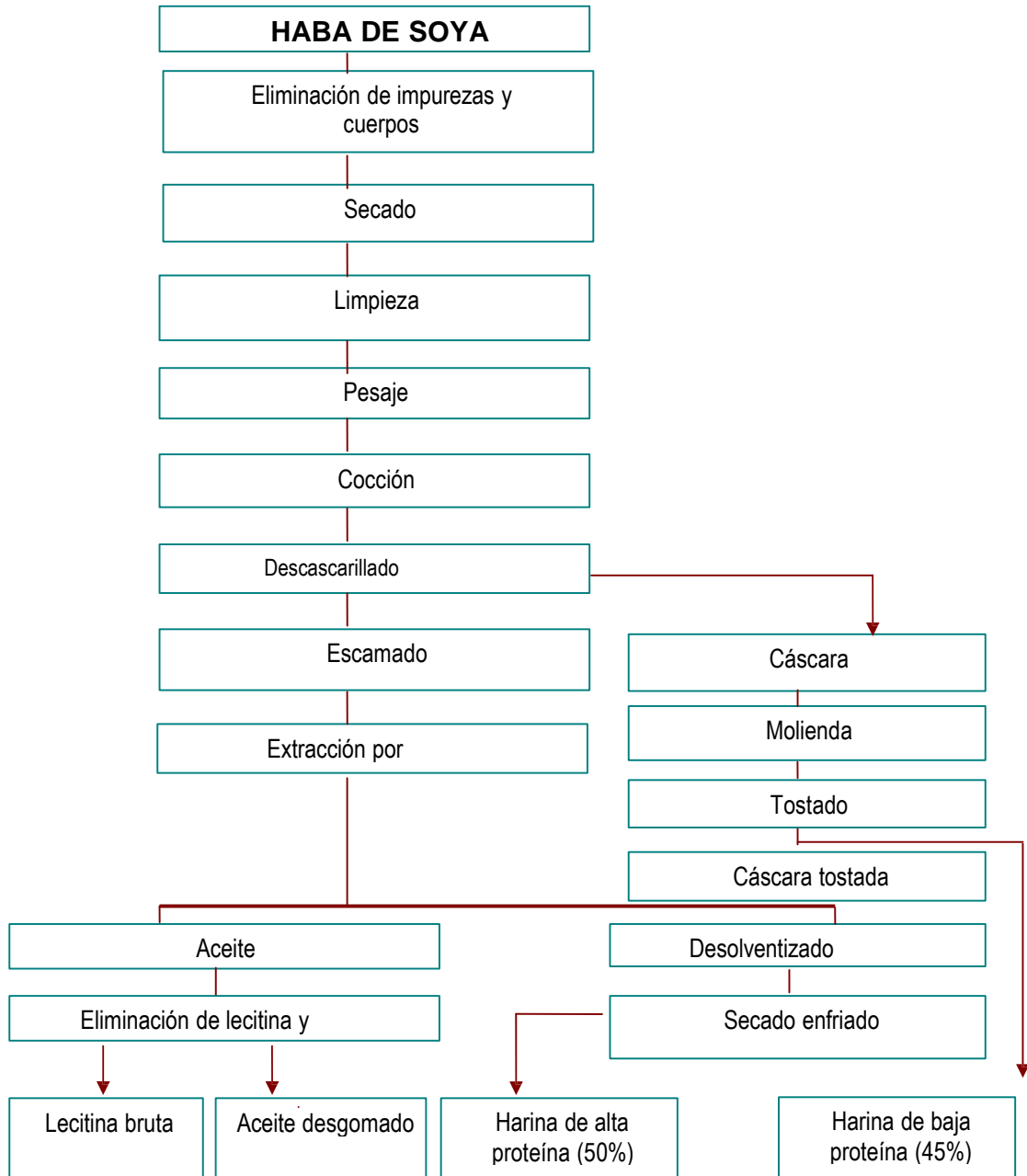


Fuente. <http://infocampo.com.ar>

**2.1.1. Extracción del aceite**<sup>(15)</sup>. Después de comprobar el contenido de humedad, aceite y proteína, cada lote de haba de soya se somete a una limpieza mayor, se seca cuando la humedad sea grande, se mezcla con otros lotes para tener una materia lo más homogénea posible y se almacena en el silo hasta su elaboración. El proceso más común de extracción del aceite es la extracción continua directa con solventes. El primer paso es el descascarillado de las habas; mediante su paso por una serie de cilindros, la corteza se separa del haba por succión. Este paso, sin embargo, es opcional, ya que generalmente se lamina la semilla sin descascarillado previo. El mayor o menor grado en que esas cortezas se mezclarán con la harina después de la transformación, dependerá del nivel de proteína que se quiera conseguir. Las habas después se molturan y se pasan por cilindros laminadores para formar escamas uniformes. El contenido de aceite de esas

escamas se extrae con solvente. La harina es tostada a una temperatura en la que se eliminan los factores antinutricionales, sin deteriorar el contenido proteínico. Las instalaciones de molturado pueden estar equipadas para producir harina proteínica al 50 o 44%.

**Figura 8. Proceso de extracción de aceite y producción de harina a partir de haba de soya.**



Fuente. Programa Estratégico Para La Producción De Biodiesel Convenio UPME

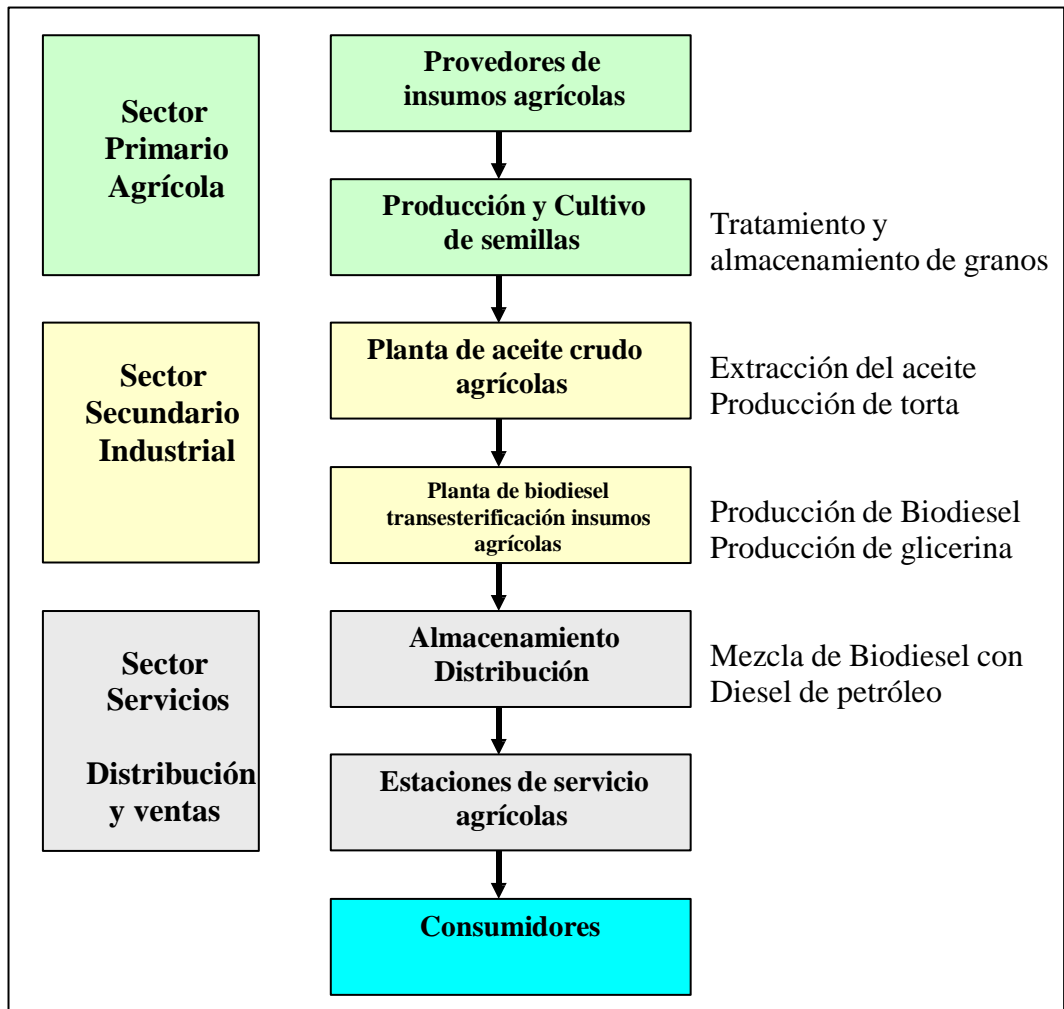
## **2.2. La Cadena Productiva Del Biodiesel De Soya <sup>(17)</sup>**

Desde el punto de vista conceptual, la producción de biodiesel a partir de aceite de soya es muy sencilla: hacer la reacción de transesterificación de triglicéridos con un alcohol (en general el metanol) con presencia de catalizador alcalino y después separar las dos fases resultantes: el biodiesel y la glicerina. Esto se puede hacer con facilidad en cualquier laboratorio de química y al igual que en pequeñas instalaciones domésticas, lo que atrae la atención de las personas con la posibilidad de hacer su propio combustible.

Para producir biodiesel con la calidad necesaria para los motores diesel, de forma sostenible y pasible de comercialización, el proceso de producción requiere mucho más. En realidad la producción comercial del biodiesel presupone la participación de los tres sectores productivos clásicos: el sector primario (agrícola), el sector secundario (industrial) y el sector terciario (servicios).

La figura 9, presenta la cadena productiva completa del biodiesel de soya. El sector primario está representado por los proveedores de los insumos agrícolas y por la producción de las oleaginosas propiamente dichas: semillas o frutos.

**Figura 9. La Cadena Productiva Del Biodiesel De Soya.**



Fuente. Perspectivas Para El Biodiesel Convenio Cepal- Waldyr Ribeiro

Además de producir oleaginosas, el sector agrícola también realiza otras funciones tales como el tratamiento básico y el almacenamiento del producto hasta su transporte al sector industrial. Una buena productividad agrícola es fundamental para que el aceite tenga costos bajos.

El sector industrial en principio posee dos etapas: la extracción del aceite de las oleaginosas y la producción del biodiesel. En general, estas dos etapas no están integradas. La etapa de extracción de aceite constituye una industria que está

orientada a la producción de aceites en grados comerciales, y tiene varios procesos con la finalidad de obtener la calidad necesaria para cada uno de los usos del aceite, dictados por el mercado a ser atendido. Como el que ocurre con el aceite de soya para fines comestibles, que es desgomado, neutralizado, desodorizado y eventualmente hidrogenado.

La extracción del aceite puede hacerse de forma mecánica o con empleo de solventes. La extracción mecánica consiste en aplastar las semillas separando el aceite del producto restante, que forma la llama "torta". Existen varios modelos de extractores mecánicos, cada uno más adecuado a ciertos tipos de oleaginosas o a la capacidad de la instalación: la prensa extractora que retira hasta 80% del aceite, la prensa tornillo un poco menos eficiente y la prensa hidráulica manual que es la menos eficaz y retira tan solo un 60%-65% del aceite.

Para obtener altas eficiencias de extracción (hasta 98%) con bajo costo, la extracción con solvente es la más eficaz. En general, se emplea el hexano como solvente. Esta técnica puede ser empleada después de la extracción mecánica o de forma aislada. El material oleaginoso es saturado con solvente y el aceite se disuelve en el solvente. La torta es separada de la fase líquida y después se hace la separación del solvente por destilación. El solvente es entonces reciclado para otra extracción. La torta posee aún un poco de hexano que debe ser retirado antes de su uso para alimentación animal.

La segunda etapa industrial es la producción del biodiesel a partir del aceite. En primer lugar, la materia prima debe ser preparada para una reacción eficiente. Para que la transformación de triglicéridos en biodiesel sea eficiente, es necesario poner considerable exceso de metanol, el cual quedará en la fase de la glicerina. El biodiesel producido en la transesterificación necesita ser purificado. Para que los subproductos puedan ser aprovechados, el metanol debe ser recuperado de la fase

de glicerina y la glicerina, a su vez, debe ser purificada para poder ganar condiciones de comercialización. Esta etapa está detallada adelante.

Después de producido, el biodiesel necesita llegar hasta los consumidores. En fases iniciales de implementación, el biodiesel puede ser distribuido para flotas o servicios que tengan su propio sistema de almacenamiento. Para la comercialización amplia, es necesario que los distribuidores de combustibles y estaciones de servicio estén integrados al proceso y preparados para almacenar el biodiesel, hacer la mezcla con diesel y atender a los consumidores individuales.

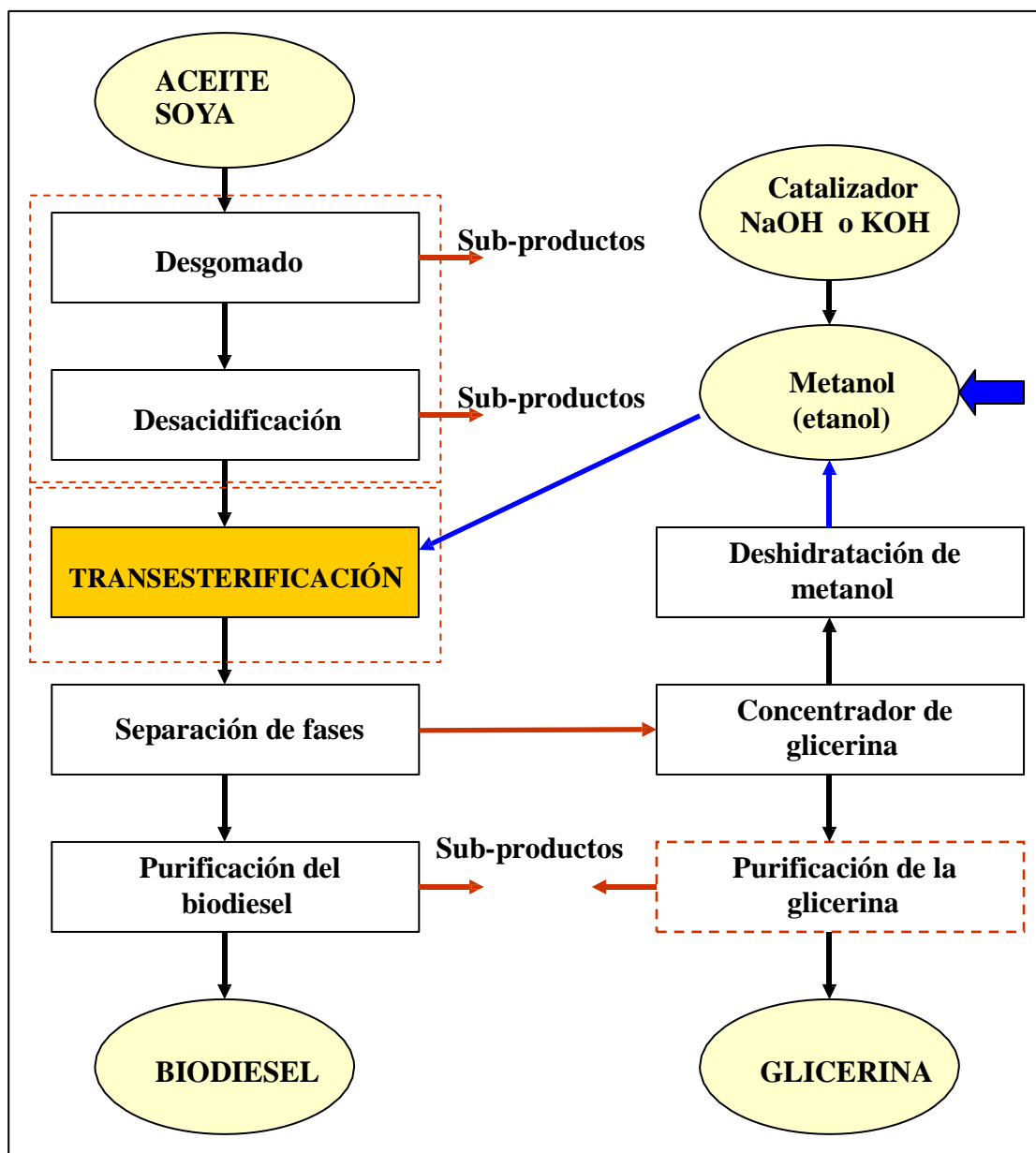
### **2.3. LA PLANTA DE BODIESEL <sup>(17)</sup>**

La figura 10, muestra de forma esquemática los diferentes procesos para la producción del biodiesel de Soya.

La primera etapa es la preparación de la materia prima. Esta etapa tiene como objetivo crear las mejores condiciones para hacer efectiva la reacción de transesterificación con alta tasa de conversión del aceite o grasa en biodiesel. Los aceites brutos necesitan ser desgomados. A veces, es necesario deshidratar la materia prima; otras veces es necesario reducir su acidez, causada por FFA's (free fat acids – ácidos grasos libres) que pueden comprometer la reacción de transesterificación y la calidad del biodiesel; otras veces, es necesario retirar materiales extraños y sales de la materia prima.

Para cada tipo de materia prima puede ser necesaria una combinación de procedimientos. Esta etapa es aquella que pone mayores dificultades para aprovechar aceites o grasas con propiedades muy variables, como ocurre con las materias primas alternativas.

Figura 10. Proceso De Producción Del Biodiesel De Soya.



Fuente. Perspectivas Para El Biodiesel Convenio Cepal- Waldyr Ribeiro.

La reacción de transesterificación propiamente dicha es la etapa de conversión del aceite en biodiesel.

Es necesario resaltar, que la transesterificación es una reacción reversible. Entonces, para que la conversión en biodiesel de los triglicéridos presentes en el aceite sea alta, se necesita de metanol en exceso y un catalizador alcalino, generalmente el hidróxido de sodio o de potasio.

Después de la reacción, existen dos fases distintas: la fase del biodiesel (más ligera) y la fase de la glicerina (más pesada). La fase de glicerina está compuesta por glicerina bruta, impregnada por exceso de metanol, agua e impurezas de la materia prima. La fase de biodiesel está compuesta por una mezcla de ésteres metílicos (el biodiesel) impregnada también por impurezas, en particular el metanol. La separación de estas dos fases puede ocurrir por decantación o por centrifugación.

Acto seguido, los alquil-ésteres producidos (biodiesel) deben ser purificados, es decir, en general lavados y deshidratados, o filtrados para eliminar las impurezas y alcohol residual para garantizar la calidad adecuada del producto a los motores diesel, expresada a través de sus especificaciones técnicas.

La fase de glicerina bruta debe sufrir un proceso de concentración, con recuperación del alcohol, en general, por evaporación de los volátiles. En particular, la mayor parte del exceso de alcohol sale en esta fase.

Todo el alcohol recuperado está hidratado. Para poder ser reusado en la reacción, el alcohol debe ser deshidratado por destilación (caso del metanol) o por otros métodos (caso del etanol).

Para obtener mejores precios para la glicerina, la glicerina bruta puede ser purificada empleando destilación en vacío, resultando una glicerina límpida y transparente, de mayor valor económico. El residuo de este proceso, alrededor de 10% del peso inicial puede aún tener aplicaciones.

## 2.4. CARACTERÍSTICAS DEL BIODIESEL DE SOYA <sup>(17)</sup>

El biodiesel de Soya 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 del aceite de soya 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.

**Tabla 3. Características Principales Biodiesel Soya**

<b>IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA</b> <b>Nombre:</b> Ester Metílico de aceite de soya <b>Sinónimo:</b> FAME, METIL ESTER, SME, BIODIESEL, B100 <b>Nombre Comercial:</b> BIODIESEL <b>Sustancia/ Composición:</b> Ester metílicos de ácidos grasos de aceite de soja C14-C24
<b>PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS</b> <b>Estado Físico:</b> líquido límpido <b>Apariencia:</b> translucido libre de sedimentos y/o partículas extrañas. Color ámbar claro a ámbar amarillento <b>Olor:</b> leve olor graso Característico <b>Ph:</b> N/A <b>Punto de Ebullición:</b> >200°C <b>Punto de Inflamación:</b> >130°C <b>Densidad (60 °F):</b> 0.88 g/cc aprox. <b>Presión De Vapor:</b> <2 mm Hg <b>Solubilidad:</b> insoluble en agua, soluble en: aceites y grasas <b>Viscosidad (40°C):</b> 4.1cSt aprox. <b>Temperatura de Auto ignición:</b> N/A

#### **ESPECIFICACIONES**

**Índice de acidez (mg KOH/g):** Máx. 0,5

**Glicerina Total (%m/m):** Máx. 0,25

**Contenido de mono glicéridos (%m/m):** Máx. 0,80

**Contenido de di glicéridos (%m/m):** Máx. 0,20

**Contenido de tri glicéridos (%m/m):** Máx. 0,20

**Glicerina Libre (%m/m):** Máx. 0,02

**Contenido de agua (ppm):** Máx. 500

**Estabilidad a la oxidación (hrs):** Min. 8

**Contenido de Ester (%m/m):** Min. 96,5

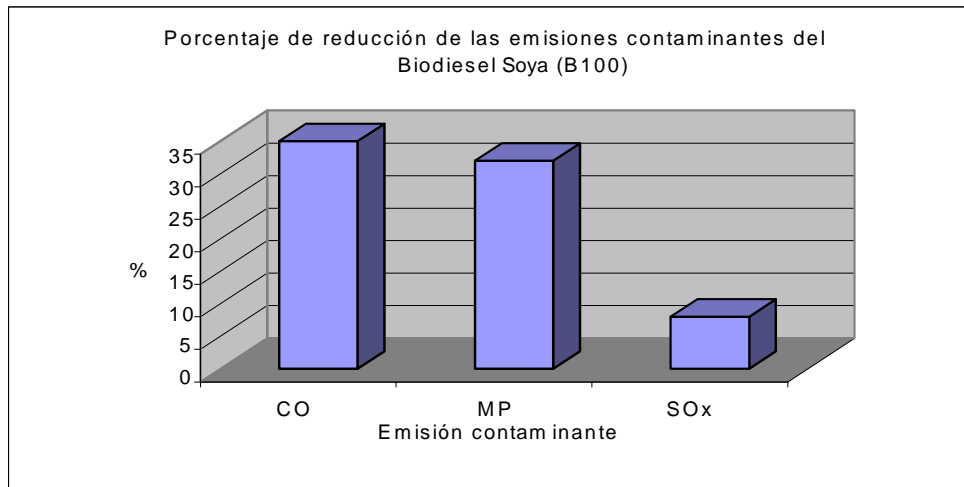
**Contaminación total (mg/kg):** Max. 24

Fuente. Ficha Técnica del Biodiesel de Soya Propiedades Físicas y Químicas –AOM

## **2.5. ASPECTO AMBIENTAL<sup>(15)</sup>**

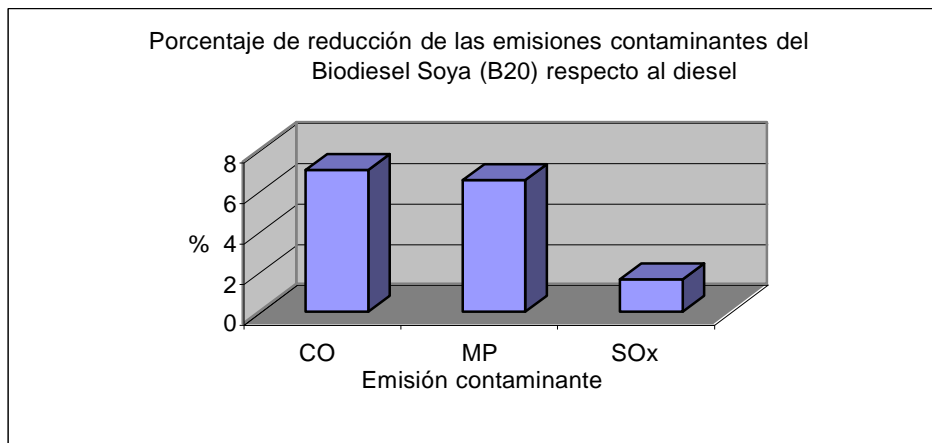
El efecto del biodiesel en la calidad del aire se rige por reacciones complejas que se suscitan en el proceso de combustión y de las interacciones de las emisiones contaminantes. Estudios recientes han mostrado que el uso de biodiesel reduce contaminantes del aire. Es así como usando sólo biodiesel (B100) como combustible en vehículos, se reducen emisiones de material particulado (MP) hasta en un 32%, de monóxido de carbono (CO) en 35% y de óxidos de azufre (SOx) en 8%2 en comparación con el diesel. La Environment Protection Agency -EPA enfatiza en el control de estos contaminantes puesto que presentan alto riesgo para la salud humana.

**Figura 11. Emisión de gases de combustión usando biodiesel Puro de Soya**



Fuente: Midwest Research Institute USA.

**Figura 12. Emisión de gases de combustión usando biodiesel Soya mezclado en un 20% con Diesel.**



Fuente: Midwest Research Institute USA.

- 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. <sup>(4)</sup>

- 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. <sup>(4)</sup>

- 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. <sup>(4)</sup>

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. <sup>(4)</sup>

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

El Diesel (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. <sup>(4)</sup>

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. <sup>(4)</sup>

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. <sup>(4)</sup> 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 CO<sub>2</sub> nulo debido a que se originen es biológico.
- Impacto ambiental. El Biodiesel puro (B100) comparando con el Diesel, reduce las emisiones de todos los contaminantes, incluyendo materias particuladas, excepto el NOx 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%.<sup>(4)</sup>
- Sustitución del Diesel por aceite mineral. La introducción de los aceites minerales como sustituto del Diesel (gas oil) en la formulación de los fluidos base aceite han disminuidos el grado de toxicidad de los desechos generados durante el proceso de perforación y han facilitado su manejo y disposición final.

Otro factor importante considerado en la aplicación de las técnicas de preservación ambiental para los desechos líquidos y sólidos, productos de la actividad de perforación, es el costo generado. En este sentido los fluidos cuya fase continúa es aceite mineral han remplazado los base diesel.

- Nuevas tecnologías. Hoy día se han implementado nuevas tecnologías orientadas a mejorar la calidad ambiental de los fluidos utilizados en perforación, siendo estos cada vez menos tóxicos y más biodegradables tanto aeróbica como anaeróbicamente.
- Dentro de estas nuevas tecnologías aplicadas a los fluidos base aceite se tienen:
- Tratamiento de rípios por biodegradación. Es una técnica basada en los principios de biodegradación de la materia orgánica para el tratamiento de los rípios.
- En áreas de difícil acceso se mezclan materiales vegetales con nutrientes en proporciones específicas de origen natural, no tóxico, que facilita la biodegradación de los compuestos orgánicos presentes en los rípios.
- Inyección somera: Esta técnica es aplicada sobretodo en perforaciones exploratorias donde existen ecosistemas de alta sensibilidad. En estos casos se evita el dragado de áreas pobladas por manglares, lo cual sería necesario para el transporte de rípios a tierra firme.
- Encapsulamiento: Mediante la aplicación de esta tecnología se transforman los rípios de perforación en materiales o agregados que pueden ser utilizados en el área de ingeniería civil.
- Disposición: Esta tecnología permite minimizar la generación de desechos en fuentes y facilita su aprovechamiento y recuperación, y es utilizada en áreas donde no hay otra alternativa que la disposición.

- Tratamiento de efluentes y desechos sólidos. Las nuevas normativas ambientales limitan la utilización de productos contaminantes en los fluidos de perforación y regula la descarga de los fluidos contaminados. Hoy día se técnicas de "Cero Descarga" y "Localización Seca" en tierra.
- La técnica "Localización Seca" trata los desechos sólidos por biotratamiento y los líquidos por clarificación (Dewatering).

### **2.5.1. Aceites Esterificados Utilizados Como Fase Continua En La Formulación De Lodos De Emulsión Inversa.**

Estudio realizado por Petróleos de Venezuela (PDVSA), Aplicación de Campo de aceite de baja toxicidad en pozos de alto riesgo-2007. <sup>(6)</sup>

Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA), ha desarrollado una extensa actividad en la perforación de pozos profundos en los campos ubicados en el Estado Monagas. La perforación en estas áreas es de alto riesgo como consecuencia de su complejidad geológica con profundidades medias de 17000 pies, temperaturas en rangos de 300 °F que requieren del uso de fluidos base aceite. Inicialmente, esta fase continua fue Diesel que contiene una cadena de Carbonos entre C<sub>12</sub> y C<sub>18</sub> con alto contenido de Aromáticos. Estos fluidos generaban desechos sólidos impregnados con aceite que requerían de tratamientos costosos para poder reducir su grado de toxicidad e impacto ambiental. <sup>(6)</sup>

PDVSA, considerando el efecto contaminante de los fluidos base aceite Diesel en la actividad de perforación de pozos ha desarrollado un programa agresivo para reducir el impacto ambiental con la utilización de fluidos base aceite, con baja toxicidad y alto grado de biodegradabilidad, tanto aeróbica como anaeróbica, así como la aplicación de técnicas avanzadas en el tratamiento de los desechos sólidos y líquidos.

Los resultados obtenidos han permitido a PDVSA utilizar aceite Vegetal, de baja toxicidad con alto grado de biodegradabilidad que permiten obtener fluidos con excelentes propiedades reológicas y alta lubricidad que favorecen la perforación de los pozos y facilitan la preservación del ambiente con la recuperación a corto plazo de las zonas afectadas con la siembra de vegetación autóctona. A partir del año 1999 se reemplazó el aceite diesel como componente de los fluidos por aceite vegetal en todos los pozos de perforación. <sup>(6)</sup>

El área del Norte de Monagas, se caracteriza por su gran complejidad geológica con profundidades superiores a los 17000 pies. Normalmente presenta una extensa sección lutítica altamente hidratable conocida como la formación Carapita que requiere de fluidos con alta capacidad de inhibición para su perforación. La sección productora está conformada de arenas masivas extremadamente abrasivas y con bajo índice de perforabilidad, presencia de gases agrios (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) y temperaturas mayores de 300 °F. Estas condiciones ameritan que se utilicen fluidos de perforación que soporten altas temperaturas y sean resistentes a los efectos contaminantes de los fluidos presentes en las formaciones.

Para poder cumplir con estos requerimientos se utilizan los fluidos de perforación base aceite, ya que cumplen con estas exigencias.

La biodeversidad del área condujo a la evaluación del aceite vegetal esterificado Greenoil (MR), en el pozo FUC-34 IA, ubicado en el campo El Furrial, perforando la sección intermedia desde 5200 pies hasta 13386 pies; el comportamiento reológico del sistema mostró estabilidad similar al observado en pozos perforados con fluido base aceite con Diesel como fase continua, con la ventaja de obtenerse un incremento en la tasa de penetración de 16% comparada con la obtenida en el pozo vecino FUC-35, perforado simultáneamente con fluido invertido base Diesel y usando el mismo tipo de broca, la cual se atribuye a una mayor capacidad de limpieza de hoyo (alto punto cedente y altos geles) y una mejor lubricidad

proporcionada por el éster. Los desechos sólidos presentaron un alto grado de biodegradabilidad aeróbica y anaeróbica. <sup>(6)</sup>

- **Evaluación Toxicología <sup>(6)</sup>**

La prueba de toxicidad determina si la concentración de un compuesto se encuentra en niveles que causan efectos letales en organismos expuestos.

Toxicidad aguda (CL50): Mide la mortalidad del 50% de los organismos expuestos a diferentes concentraciones del compuesto al cabo de un cierto tiempo de exposición. Los protocolos de ensayo se fundamentan en los sugeridos por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., pero modificados a condiciones particulares de especies Tropicales.

- **Evaluación de la Biodegradabilidad Aeróbica <sup>(6)</sup>**

La velocidad de biodegradación del aceite vegetal fue determinada con ciertos compuestos orgánicos, tomando mediciones de CO<sub>2</sub> y crecimiento bacteriano; los resultados indican que los mismos tienen una velocidad de biodegradación de 65% en 28 días a condiciones de laboratorio.

- **Aceite Vegetal Esterificado <sup>(6)</sup>**

Es un éster obtenido a partir del aceite de palma africana y de una reacción catalítica con el alcohol etílico; es totalmente biodegradable. Los aceites de partida, por ser ésteres de ácidos grasos naturales poseen una distribución y peso molecular que representan cadenas alifáticas de C15-C17, cuya proporción depende de su origen. La tabla N°4, muestra las características más importantes de los aceites vegetales.

El fluido y aceite vegetal no persistirán en ambientes anaeróbicos, tales como sedimentos del Lago de Maracaibo y Delta del Orinoco debido a su alta biodegradabilidad en condiciones anóxicas. Los ríos base aceite vegetal pueden ser tratados en el campo aplicando la técnica de biorremediación sin necesidad de airearlos con maquinaria agrícola, lo cual favorece una rápida regeneración de la cobertura vegetal y genera ahorros en el costo de su tratamiento. <sup>(6)</sup>

Las pruebas de toxicidad y biodegradabilidad del éster, se muestran en las tablas N°5 y N°6, respectivamente.

**Tabla 4. Características de los Aceites Esterificados**

<b>Propiedad</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Aceite de Soya</b>	<b>Aceite de Palma</b>
Densidad (g/cc)	59	0,9242	0,9153
Viscosidad (cP).	72	58,35	45,18
Punto de Fluidez	--	-12	24
Punto de Inflamación	--	315	313
Indice Refracción	40	1,4673	1,4587

Fuente: Aplicación de Campo de aceite de baja toxicidad en pozos de alto riesgo. PDVSA- 2007

**Tabla 5. Pruebas de Toxicidad, Aceite Vegetal Esterificado**

Bioindicador	LC50-48Hrs.	Clasificación
Daphnia Magna (D)	70000	No Tóxico
Artemia SP (M)	>84000	No Tóxico
Ptotobacterium	36700	No Tóxico

Fuente: Aplicación de Campo de aceite de baja toxicidad en pozos de alto riesgo.  
PDVSA- 2007

(D): Dulceacuicolas.

(M): Marinos.

**Tabla 6. Pruebas de Biodegradabilidad, Aceite Vegetal Esterificado**

	Biodegradación	
	Aeróbica	Anaeróbica.
Ester de Palma		
	65 %	83 %
Valor establecido ASTM	>60 %	>75 %

Fuente: Aplicación de Campo de aceite de baja toxicidad en pozos de alto riesgo.  
PDVSA- 2007

## 2.6. PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE DIESEL Y BIODIESEL <sup>(4)</sup>

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

- La densidad y la viscosidad cinemática del Biodiesel 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.

## **2.7. PROBLEMAS DEL BIODIESEL FRENTE AL DIESEL <sup>(4)</sup>**

**2.7.1. 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 Soya, oliva, etc.)

Para un Biodiesel procedente de un aceite residual el POFF está entre  $-7$  y  $0^{\circ}\text{C}$ , lo cual es insuficiente para invierno. Utilizando un Biodiesel de origen animal el POFF es todavía superior.

**2.7.2. 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.

**2.7.3. 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.

**2.7.4. 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.

**2.7.5. Problemas de Estabilidad.** El Biodiesel 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.

### **3. FORMULACIÓN DE LODOS DE EMULSIÓN INVERSA USANDO BIODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINÚA**

Como respuesta a la problemática ambiental del uso del diesel en fluidos de perforación base aceite, se hace necesario utilizar fluidos que cumplan con los requerimientos de perforación y que sean amigables al ambiente. En este sentido, las formulaciones de estos fluidos son cada vez más exigentes. Para el caso de los aceites esterificados, se tiene que un éster obtenido a partir de la soya y de una reacción catalítica con el alcohol es totalmente biodegradable.

En la perforación de pozos con fluidos de perforación base aceite, se utiliza una formulación cuya fase continua es Diesel. Este aceite presenta un alto contenido de aromáticos (>22%) componente que impacta la Fauna acuática, retarda la regeneración de la capa vegetal y crea efectos contaminantes severos al ambiente que necesitan de tratamientos costosos para reducir el impacto generado por los desechos sólidos y líquidos. Tomando en consideración la preservación ambiental, se estudió la factibilidad de reemplazar el Diesel en las formulaciones del fluido de perforación por Biodiesel a base de soya. Este es un producto 100% natural, no contiene sustancias tóxicas o nocivas para la fauna o la flora, es una materia prima renovable y de suministro constante, con menor contenido de aromáticos y con un alto grado de biodegradación. Además el uso de este genera una reducción sustancial del costo en los tratamientos de los desechos.

En el presente estudio, se realizaron las pruebas necesarias tendientes a evaluar el uso del Biodiesel de Soya y la comparación de las mismas características con un aceite diesel, luego se prepararon lodos con diferentes formulaciones en el laboratorio de lodos y cementos de la Escuela De Ingeniería De Petróleos de la

Universidad Industrial De Santander y se realizó la caracterización del biodiesel de Soya y diesel en el laboratorio de fluidos de dicha Escuela.

### **3.1. REFERENCIAS SOBRE EL USO DE SUSTITUTOS DE LA FASE CONTINÚA EN LODOS DE EMULSIÓN INVERSA**

Sabiendo que en años recientes, los fluidos de perforación base aceite son formulados empleando ésteres, éteres o polialfaolefinas como la fase continua del fluido, los cuales se encuentran disponibles como alternativas, surge la utilización del biodiesel de soya como la continuación de estudios realizados previamente; que buscaban encontrar un sustituto a la fase continúa amigable para el medio ambiente.

Entre estos posibles sustitutos han sido analizados en investigaciones anteriores en la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander; aceites vegetales tales como el aceite de palma y la glicerina, así como también Biodiesel a base de palma. 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.

En la universidad industrial de Santander, se han realizado tres estudios:

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

Autores: ACOSTA GONZALEZ SERGIO Y RUEDA VARGAS GERMAN

En este estudio la viscosidad del lodo preparado con aceite de palma resulto ser excesivamente viscoso.

Este proyecto fue realizado en el año de 2002 bajo la dirección de Msc. Emiliano Ariza León.

- **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

En este proyecto los análisis de viscosidad en las formulaciones preparadas con glicerina resultaron ser excesivamente viscosas.

Este proyecto fue llevado a cabo en el año de 2008 bajo la dirección de Msc. Emiliano Ariza León.

- **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL BIODIESEL COMO FASE CONTINÚA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA.**

Autores: BENAVIDES AYALA FABIO Y GÓMEZ QUINTERO JIMMY

Los resultados de este proyecto de grado fueron favorables; desde el punto de vista técnico los autores comprobaron que es factible emplear como fase continúa en lodos de emulsión inversa el Biodiesel a base de palma; aunque la viscosidad es mayor que la base Diesel, la formulación presento buenas propiedades para lodos de perforación.

Este proyecto fue llevado a cabo en el año de 2010 bajo la dirección de Msc. Emiliano Ariza León.

## **OTRAS INVESTIGACIONES CONOCIDAS**

- Especialistas de PDVSA desarrollaron, con resultados muy positivos, en el año de 2005 un aceite 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 ripsos 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 el empleo de la soya, como elemento predominante en la elaboración del fluido.

- INTEVEP S.A. GREENOIL (Producto obtenido de la síntesis de ésteres de aceites vegetales): un fluido de perforación ambientalmente seguro. REVISTA VISION TECNOLOGICA Volumen 7 – Número 1/1999.

- 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 usado<sup>5</sup>.

- En 1997 en el 15 congreso mundial de petróleo se destacó 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 tasa de penetración debido a los cambios efectuados por estos aditivos<sup>6</sup>.

- La SPE en el año de 2005 publicó: “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 las operaciones a alta temperatura<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Paper Number 26737-MS Authors Degouy, Didier, Argillier, J-F., Inst. Français du Pétrole; Demoulin, André, Velghe, Firmin, Fina Research.

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

<sup>7</sup> Paper Number 97008-MS Authors Md. Amanullah, SPE, CSIRO Petroleum.

- Evaluación de las Propiedades Físicas de un Fluido de Perforación Formulado con Aceite Vegetal de Palma Green Oil Como Alternativa Ecológica Durante las Perforaciones en Plataformas Costa Afuera. Autor: Br. Jorge Rosas.

El propósito de este estudio fue el de evaluar las propiedades físicas de un fluido de perforación formulado con aceite vegetal de palma Green Oil como alternativa ecológica durante las perforaciones en plataformas costa afuera.

Este trabajo se realizó con la finalidad de determinar qué efecto ocasionaría en las propiedades físicas la formulación de un fluido de perforación base aceite vegetal Green Oil en la actividad de perforación costa afuera.

Realizada la investigación el autor pudo concluir que Green Oil posee la misma efectividad operativa que los fluidos de perforación formulados a base de aceite mineral (diesel), pero con respecto a biodegradabilidad, Green Oil posee serias ventajas sobre el fluido de perforación a base (Diesel). Además el aceite vegetal de palma Green oil, no es toxico ni en columnas de agua ni en sedimentos, a diferencia del aceite Diesel.

### **3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL <sup>(12)</sup>**

El Diseño de Experimentos tuvo su inicio teórico a partir de 1935 por Sir Ronald A. Fisher <sup>8</sup>, quién sentó la base de la teoría del Diseño Experimental y que a la fecha se encuentra bastante desarrollada y ampliada. Actualmente las aplicaciones son múltiples, especialmente en la investigación de las ciencias naturales, ingeniería, laboratorios y casi todas las ramas de las ciencias sociales.

---

<sup>8</sup> FISHER, Ronald Aylmer. (1890 –1962) Científico, matemático, estadístico, biólogo evolutivo y genetista inglés.

La experimentación proporciona los datos experimentales, en contraste con los datos de la observación; los datos de la observación se representan como su nombre indica por observaciones de las unidades elementales de una población o de una muestra, y no deben ser cambiados ni modificados por ningún intento de parte de un investigador en el curso de la observación.

El diseño experimental es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés.

El diseño experimental prescribe una serie de pautas relativas qué variables hay que manipular, de qué manera, cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden para poder establecer con un grado de confianza predefinido la necesidad de una presunta relación de causa-efecto.

El propósito de un diseño experimental es proporcionar métodos que permitan obtener la mayor cantidad de información válida acerca de una investigación, teniendo en cuenta el factor costo y el uso adecuado del material disponible mediante métodos que permitan disminuir el error experimental.

Frecuentemente cuando se estudia un grupo de tratamientos, los resultados absolutos varían erráticamente mientras que los resultados relativos permanecen razonablemente estables. En tales situaciones es posible establecer, que en circunstancias similares se espera que ciertos tratamientos sean sustancialmente mejores que otros, aunque los resultados de un solo tratamiento no pueden ser establecidos exactamente. En tales campos de la experimentación, los experimentos tienden a ser comparativos y tienen un interés secundario dado por los resultados absolutos. Brownlee (1957) clasifica estos experimentos como

ciencias aplicadas. La teoría estadística del diseño de experimentos se relaciona inicialmente con este tipo de experimentos<sup>9</sup>.

El objetivo de este tipo de experimentos es dar información clara necesaria para tomar decisiones satisfactorias. La principal característica de este tipo de experimentación es que todos los tratamientos de interés están incluidos en el experimento. Consecuentemente, la estructura matemática básica es el modelo de efectos fijo de Eisenhart (1947) ya que bajo experimentos repetidos se seleccionaran los mismos tratamientos. En este caso, es de interés la detección y estimación de relaciones determinadas entre las medias del universo de objetos considerados.

Para estos modelos, el interés primordial es probar varias hipótesis relacionadas con las medias de los tratamientos.

El experimento comparativo comienza con un planteamiento exacto del problema a ser resuelto. Esto es, se debe hacer una especificación detallada de los objetivos del experimento con una formulación precisa de la hipótesis a probar. Es insuficiente solamente establecer en forma simple “comparar estos tratamientos”.

Esta especificación define la población a la cual las conclusiones serán aplicadas, determina los factores, tratamientos y sus niveles, especifica las variables respuesta a ser medidas y establece las diferencias críticas a ser detectadas. Sin estas especificaciones, ningún experimento podrá ser diseñado adecuadamente. Como lo fundamental en la decisión sobre las hipótesis son los experimentos planeados, es necesario que se tenga en cuenta las siguientes características para estos ensayos.

---

<sup>9</sup> KUEHL, Robert O. Diseño de Experimentos. Editorial Thomson Learning, 2 edición.

**3.2.1. Diferentes Tipos De Variables En El Diseño De Un Experimento.** En un Diseño de Experimento se distinguen los siguientes tipos de variables, según el contenido conceptual, o papel que tienen en el mismo.

**3.2.1.1. Variable independiente.** Es el factor (causa) que suponemos influye sobre la característica que medimos (defecto, error, etc). Para comprobar su influencia, el investigador la manipulará durante el Experimento, en el sentido que le asignará valores diferentes a cada observación.

Esta variable se llama también "tratamiento" y cada uno de los valores que se le asignarán "nivel de tratamiento".

En este Procedimiento se consideran sólo Experimentos con una única variable independiente.

Si se quiere o necesita manipular más de una variable independiente, será necesaria la colaboración de un experto en estadística, puesto que el Diseño del Experimento y la interpretación de los resultados se complican notablemente.

**3.2.1.2. Variable dependiente.** Es aquella variable que se mide en cada observación del Experimento, para establecer si la variable independiente efectivamente influye sobre sus valores.

**3.2.1.3. Variables extrañas.** Son todas aquellas que el investigador no puede manipular, pero influyen en la variable dependiente. Son la causa de que las observaciones en un mismo nivel de tratamiento no necesariamente arrojen el mismo valor de medida.

El conjunto de variables extrañas se denomina generalmente en el Diseño y Análisis de Experimentos "ruido" o "error experimental".

**3.2.1.4. Variable de bloqueo.** Es una variable que sabemos puede intervenir en los niveles de la variable dependiente y decidimos eliminar su influencia mediante el control de la misma, creando bloques de observaciones, en los que esta variable, asume respectivamente un valor constante. A cada bloque se asignarán todos los niveles de tratamiento.

Con la creación de bloques se persiguen dos objetivos:

- Aislar el efecto de los tratamientos, eliminando la influencia de la variable de bloqueo.
- Estimar los efectos de los bloques.

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 de soya 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 afectada por la variación en la concentración del aceite. Ellas son: Propiedades reológicas, Tasa de filtración (HPHT), 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 realizarán a las mismas medidas de estas variables.

**Tabla 7. Diseño Experimental Factibilidad Técnica y Económica Del Uso Del Biodiesel de Soya Como Fase Continúa En Lodos De Perforación De Emulsión Inversa.**

<p><b>DISEÑO EXPERIMENTAL: “FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DEL BIODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINÚA EN LODOS DE PERFORACION DE EMULSION INVERSA”</b></p>
<p style="text-align: center;"><b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b></p>
<p>Las empresas perforadoras utilizan dos clases de lodo para perforar pozos petroleros, lodos base agua y lodos base aceite. Los lodos base agua son los más utilizados por ser biodegradables, económicos y seguros, pero no se pueden usar en pozos de formaciones geológicas con alto contenido de arcillas. Las arcillas tiene la capacidad de retener agua en proporciones que alcanzan varias veces su propio volumen, este efecto causa graves daños e inclusive la pérdida del pozo; en estos casos se requiere un lodo base aceite. Para un perforador, los lodos base aceite controlan las lutitas reactivas, mejoran las velocidades de penetración y aumentan la eficiencia general de la perforación.</p> <p>Generalmente en fluidos de perforación base aceite, el aceite que se utiliza como fase continúa; es el diesel o aceites minerales de origen hidrocarburos, que son altamente contaminantes. tóxicos v muy difíciles de dearadar.</p>
<p style="text-align: center;"><b>OBJETIVOS</b></p>
<p>Objetivo General: Realizar Un Estudio De Factibilidad Técnica y Económica Del Uso Del Biodiesel De Soya Como Fase Continúa En Lodos De Perforación De Emulsión Inversa.</p>
<p>Objetivos Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Estudiar mediante pruebas de laboratorio el uso del biodiesel como fase continúa en lodos de perforación de emulsión inversa.</li> <li>-Realizar un análisis comparativo del rendimiento y de las propiedades, que se tiene utilizando biodiesel como fase continúa en lodos de perforación de emulsión inversa, con respecto a los fluidos que usan base diesel.</li> <li>-Realizar un estudio de costos sobre la factibilidad del uso del biodiesel de soya como fase continúa en lodos de perforación de emulsión inversa.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>CONTEXTO DEL ESTUDIO</b></p>
<p>Contexto Geográfico: Perforación de Campos Petroleros usando lodos base aceite. Contexto Teórico: Las fuentes Bibliográficas a consultar serán preferiblemente de publicación superior a 1980.</p>

<b>SUPOSICIONES TEÓRICAS</b>	
<p>Uso del biodiesel de soya de propiedades y comportamiento similares al diesel, como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.</p>	
<b>RESULTADOS ESPERADOS</b>	
<p>Probar desde el punto de vista técnico si es factible emplear el biodiesel como fase continua en lodos de emulsión inversa.</p>	
<p>Factores que pueden hacer que el estudio falle</p>	<b>OBSERVACIONES Y CONTROL</b>
<p>*Resultados de las pruebas desfavorables.</p> <p>*Incompatibilidad con los aditivos base aceite.</p>	<p>*Elementos de laboratorio adecuados y debidamente calibrados.</p> <p>*Realizar pruebas de compatibilidad con dichos aditivos para preparación de lodos base aceite.</p>
<b>DISEÑO CUASIEXPERIMENTAL</b>	
<b>Tipo De Diseño</b>	<p>El modelo de diseño será uni-factorial El análisis de varianza ANOVA en un modelo a una vía de clasificación.</p> $Y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij}$ <p>Y<sub>ij</sub> = valor respuesta i = numero de tratamientos j = número de repeticiones μ = media global de las poblaciones combinadas e<sub>ij</sub>= error experimental</p>

Fuente: Autores

<b>VARIABLES</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Independiente	1	Relación: concentración biodiesel soya, con concentración de agua.
Dependientes	5	Tasa de filtración (HPHT), Densidad, Propiedades reológicas, Análisis de retorta, Análisis químico.
Criterio de comparación	1	Lodo base Diesel (Propiedades).
Variables de bloqueo	3	Aditivos para lodos base aceite, temperatura y presión.
<b>Tipo de muestras a emplear</b>	Diesel No 2, Biodiesel de soya (Importado desde Argentina).	
<b>Tipo de Observación</b>	La observación que se va a hacer es del tipo estructurada, es decir, realizar una averiguación en la que se tiene un diseño que facilita su ejecución y toma de datos confiables.	
<b>¿Cómo se Observará?</b>	<p>-Se someterá la formulación del lodo base Biodiesel a pruebas de compatibilidad con los aditivos comunes para la preparación de lodos base aceite; así como a diferentes pruebas de laboratorio típicas en lodos base aceite. Norma API RP 13B-2.</p> <p>-Análisis comparativo del rendimiento y de las propiedades, que se tiene utilizando biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa, con respecto a los fluidos que usan base diesel.</p>	
<b>¿Cuándo se Observará?</b>	Se proyecta realizar las pruebas en un plazo máximo de 2 meses.	
<b>¿Dónde se Observará?</b>	En las propiedades reológicas del fluido y demás resultados de las pruebas a realizar, las cuales se desarrollaran en los laboratorios de la UIS.	
<b>¿Cómo se registrará la información?</b>	Los resultados de las pruebas serán registrados en formatos diseñados, también se consignarán las condiciones operacionales y observaciones de cada experimento.	

### 3.3. PRUEBAS PRELIMINARES DEL BIODIESEL DE SOYA

Las pruebas preliminares realizadas fueron:

- Determinación de la Gravedad específica según norma API
- Punto De Relampagueo y Fuego en Copa Abierta Cleveland según la norma ASTM D 92-90
- Prueba Viscosidad Saybolt ASTM D-88
- Prueba de compatibilidad del Biodiesel de Soya con los aditivos comunes de los fluidos de emulsión inversa.

Los resultados de estas pruebas se presentan a continuación:

#### 3.3.1. Caracterización Del Diesel y Biodiesel

Tabla 8. Resultados De Las Pruebas Preliminares.

	NORMA	DIESEL No.2	BIODIESEL DE SOYA
<b>Temperatura Ambiente</b>		80.5 °F	80.5 °F
<b>Gravedad °API 60/60 °F</b>	ASTM D 287 / API	35 °API	30.2 ° API
<b>Densidad 60 °F</b>		0.85 g/cc	0.875 g/cc
<b>Punto de Relampagueo</b>	ASTM D 92-90	194°F	293 °F
<b>Punto de Fuego</b>	ASTM D 92-90	207 °F	327 °F
<b>Punto de Anilina</b>	ASTM D-611	154.6 °F <sup>10</sup>	> 169 °F <sup>11</sup>

En la tabla 8 se observa que si bien el Biodiesel de soya tiene una mayor densidad relativa que el Diesel No.2, la diferencia nos es muy grande. Lo que se ve también

<sup>10</sup> Estudio De Factibilidad Del Uso Del Biodiesel Como Fase Continúa En Lodos De Perforación De Emulsión Inversa. Benavides Fabio y Gómez Jimmy

<sup>11</sup> Ficha Técnica del Biodiesel de Soya Propiedades Físicas y Químicas –AOM

reflejado en la poca diferencia de las viscosidades cinemáticas de estos dos fluidos (ver tabla 9). También se puede destacar que el punto de relampagueo del biodiesel de soya es aproximadamente 100°F mayor que la del Diesel No.2. Reduciendo así los riesgos de incendio en el taladro.

A su vez el resultado de referencia de Punto de anilina para el Biodiesel de Soya supera los requerimientos mínimos de uso en lodos base aceite, lo que haría pensar que no corroe o degrada las empacaduras de goma, sellos que entran en contacto con el lodo durante la perforación.

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

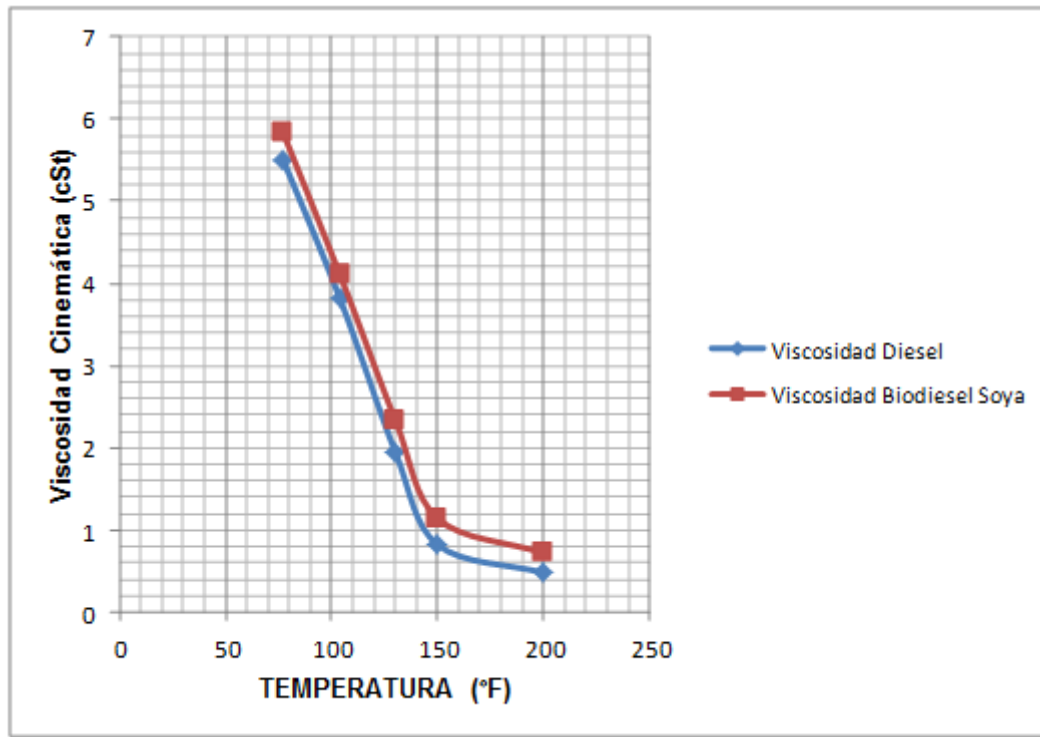
**Tabla 9. Viscosidad Cinemática del Biodiesel Soya y Diesel No.2 a diferentes temperaturas**

<b>TEMPERATURA (°F)</b>	<b>Viscosidad Cinemática Diesel (cSt)</b>	<b>Viscosidad Cinemática Biodiesel Soya (cSt)</b>	<b>% DIFERENCIA</b>
77	5,51	5,84	6
104	3,81	4,1	7,6
130	1,95	2,34	20
150	0,82	1,14	39
200	0,48	0,72	50

Fuente: Autores

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

**Figura 13. Variación de la viscosidad Cinemática del Biodiesel y el Diesel No.2 a diferentes temperaturas**



Fuente: Autores

**3.3.2. Pruebas de compatibilidad con los aditivos comunes de los fluidos de emulsión inversa.** Los aditivos para los lodos de perforación de emulsión inversa fueron probados con El Biodiesel de Soya, los productos utilizados se describen a continuación:

- Viscosificante: Es un aditivo viscosificador y gelificante de arcilla organofílica, aporta viscosidad y propiedades de suspensión a los fluidos de perforación base aceite. Esta arcilla bentonítica aumenta la capacidad de acarreo y de suspensión, al tiempo que refuerza los materiales densificantes y mejora la remoción de los recortes de perforación (ripio). El producto es eficaz hasta temperaturas por encima de 350°F (177°C).<sup>(14)</sup>

- Controlador de filtrado No.1: Es un aditivo de gilsonita (asfalto natural) que se usa para controlar la filtración en lodos base aceite, en aplicaciones de alta temperatura y alta presión. Contribuye a mejorar la estabilidad térmica de la emulsión, y la capacidad de suspensión. <sup>(14)</sup>
- Controlador de filtrado No.2: Leonardita organofílica, se utiliza para controlar la velocidad de filtración en los lodos de perforación base aceite. Es estable a altas temperaturas y puede utilizarse para controlar la velocidad de filtración en pozos profundos con alta temperatura de fondo. También se puede utilizar para aumentar la emulsificación del agua en lodos base aceite y para promover la estabilidad del fluido. <sup>(14)</sup>
- Emulsificante No.1: Un emulsificador multipropósito, es una mezcla líquida con base de aceite mineral, de selectos emulsificantes, humectantes, gelificantes y estabilizadores. Forma la emulsión básica de salmuera en aceite que requieren los sistemas de lodo base aceite y proporciona excelente estabilización de las emulsiones, humectación secundaria, viscosidad, control del filtrado y estabilidad térmica. <sup>(14)</sup>
- Emulsificante No.2: Es un surfactante orgánico multipropósito que actúa como aditivo emulsificante y humectante de aceite que contribuye con la dispersión de los sólidos incorporados. Sus funciones secundarias son el aumento de la estabilidad térmica y el control del filtrado a temperaturas y presiones altas. <sup>(14)</sup>
- Alcalinizante: Hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  utilizado como fuente de alcalinidad y saponificar el emulsificante principal. <sup>(14)</sup>
- Humectante: Dispersión líquida de lecitina, puede modificar rápidamente las características de humectación de los sólidos de perforación y agentes densificantes de los lodos base aceite, haciendo que la humectación por aceite

sea preferencial. Este agente de humectación por aceite se utiliza como aditivo complementario de lodos para mejorar las propiedades de flujo y la estabilidad de la emulsión. Las características humectantes de este agente de humectación por aceite permiten utilizarlo en la preparación y mantenimiento de todos los fluidos de completamiento base aceite. <sup>(14)</sup>

- Cloruro de calcio  $\text{CaCl}_2$ : Utilizado para dar salinidad a la fase acuosa del lodo.
- Densificante: Sulfato de Bario molido, es el agente densificante. Satisface la especificación 13 A, sección 2, de la Norma API para la baritina de fluidos de perforación. Este agente se puede utilizar para aumentar la densidad de fluidos de perforación base aceite y base agua hasta alcanzar 21 lb/gal. <sup>(14)</sup>

### **Prueba de compatibilidad**

El procedimiento de esta prueba se describe a continuación:

- En un vaso se mezcló la cantidad de aditivo equivalente a las concentraciones típicas máximas del lodo a analizar con el Biodiesel de Soya (350 ml).
- En un frasco de vidrio con tapa rotulado para cada aditivo se vertió 50 ml de la mezcla (Biodiesel Soya+ Aditivo) de prueba.
- Luego se dejó en reposo en un lugar adecuado a temperatura ambiente durante 44 días realizando observaciones periódicas.

Las cantidades de cada aditivo agregado al Biodiesel De Soya para la prueba de compatibilidad se observa a continuación en la tabla 10.

**Tabla 10. Cantidades de cada aditivo agregado al Biodiesel De Soya**

Prueba De Compatibilidad para Biodiesel De Soya			
No.	Muestra	Cantidad Biodiesel Soya (ml)	Cantidad Aditivo
1	Biodiesel + Emulsificante Primario	350	10,8 ml/bbeq
2	Biodiesel + Emulsificante Secundario	350	10,8 ml/bbeq
3	Biodiesel + Controlador de Filtrado No 1	350	10 gr
4	Biodiesel + Controlador de Filtrado No 2	350	10 gr
5	Biodiesel + Cal	350	10 gr
6	Biodiesel + Salmuera de CaCl <sub>2</sub> Relación: 70/30 O/W	241	26 gr de CaCl <sub>2</sub> + 103 ml de Agua
7	Biodiesel + Humectante	350	10,8 ml/bbeq
8	Biodiesel + Viscosificante	350	10 gr
9	Biodiesel + Densificante	350	80 gr

**Figura 14. Pruebas de Compatibilidad**



Fuente: Autores

De izquierda a derecha tenemos la Mezcla de Biodiesel de Soya y: densificante, controlador de filtrado 2, controlador de filtrado 1, viscosificante, salmuera de  $\text{CaCl}_2$ , emulsificante principal, emulsificante secundario, humectante, alcalinizante.

La prueba resulta ser 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.

**Tabla 11. Resultados de la prueba de compatibilidad**

<b>ADITIVO</b>	<b>Biodiesel De Soya</b>
Emulsificante No. 1	Compatible
Emulsificante No. 2	Compatible
Controlador de filtrado No. 1	Compatible
Controlador de filtrado No. 2	Compatible
Cal	Compatible
Salmuera de $\text{CaCl}_2$	Compatible
Humectante	Compatible
Viscosificante	Compatible
Densificante	Compatible

Fuente: Autores

#### **3.4. PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS.**

El procedimiento para realizar las pruebas de laboratorio a los lodos preparados fue común a todas las formulaciones, y siguió los siguientes pasos:

1. Preparación del lodo base Diesel No.2 según relación O/W.

2. Realización de las pruebas de Filtrado “HPHT” y de Reología al lodo preparado anteriormente.
3. Si el valor del filtrado HPHT no es aceptable según el tope establecido comúnmente por las compañías operadoras (< 6ml), se hace la corrección de la formulación. A su vez también tomando como otra variable crítica la reología de dicho lodo, si no se obtienen valores consistentes y aceptables se hace la corrección de la formulación.
4. Luego de la aceptabilidad de las características del lodo base Diesel preparado en el paso 1, este es tomado como guía para preparar la misma formulación pero, base Biodiesel de soya.
5. Preparación del lodo base Biodiesel de Soya de acuerdo a la formulación de referencia aceptada (base Diesel).
6. Se repiten los pasos 2 y 3 pero con el lodo base Biodiesel de Soya preparado en el paso 5.

**3.4.1. Formulaciones con Diesel y Biodiesel De Soya.** Se prepararon lodos con Diesel y Biodiesel de Soya 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 12, 13, 14 y 15.

Es importante aclarar que de acuerdo a la aceptabilidad en los valores obtenidos realizando las pruebas comunes para lodos base aceite. No se requirió la corrección de las formulaciones excepto a las formulaciones de Alto contenido de agua Base Biodiesel de Soya, cuya corrección de las formulaciones se muestra en la tablas 16 y 17.

**Tabla 12 – Formulación de Emulsión Firme 9 lpg**

Aditivos	Relación: 80/20 O/W	Relación: 70/30 O/W
	Cantidades	Cantidades
<b>Aceite diesel - Biodiesel de Soya</b>	Según Se Requiera O/W	Según Se Requiera O/W
<b>Agua</b>	Según Se Requiera O/W	Según Se Requiera O/W
<b>Emulsificante No. 1</b>	8 ml/ bbl	8 ml/ bbl
<b>Controlador de filtrado No. 1</b>	8 lpb	8 lpb
<b>Emulsificante No. 2</b>	1.6 ml/ bbl	1.6 ml/ bbl
<b>Cal</b>	4 lpb	4 lpb
<b>Viscosificante</b>	3 lpb	3 lpb
<b>20% CaCl<sub>2</sub></b>	Según Se Requiera	Según Se Requiera
<b>Densificante</b>	Según Se Requiera	Según Se Requiera

Fuente: Autores

**Tabla 13 – Formulación de Filtrado relajado 9 lpg**

Aditivos	Relación: 80/20 O/W	Relación: 70/30 O/W
	Cantidades	Cantidades
<b>Aceite diesel - Biodiesel de Soya</b>	Según Se Requiera O/W	Según Se Requiera O/W
<b>Agua</b>	Según Se Requiera O/W	Según Se Requiera O/W
<b>Emulsificante No. 1</b>	1.5 ml/ bbl	1.5 ml/ bbl
<b>Controlador de filtrado No. 1</b>	1.5 lpb	1.5 lpb
<b>Emulsificante No. 2</b>	3.5 ml/ bbl	3.5 ml/ bbl
<b>Cal</b>	4.5 lpb	4.5 lpb
<b>Viscosificante</b>	6 lpb	6 lpb
<b>20% CaCl<sub>2</sub></b>	Según Se Requiera	Según Se Requiera
<b>Densificante</b>	Según Se Requiera	Según Se Requiera

Fuente: Autores

Tabla 14 – Formulación de Alto Contenido de agua 9 lpg

Aditivos	Relación: 50/50 O/W	Relación: 40/60 O/W
	Cantidades	Cantidades
Aceite diesel - Biodiesel de Soya	Según Se Requiera O/W	Según Se Requiera O/W
Agua	Según Se Requiera O/W	Según Se Requiera O/W
Emulsificante No. 1	1.6 ml/ bbl	1.6 ml/ bbl
Controlador de filtrado No. 1	6 lpb	6 lpb
Emulsificante No. 2	6.5 ml/ bbl	6.5 ml/ bbl
Cal	4.5 lpb	4.5 lpb
Viscosificante	2 lpb	2 lpb
20% CaCl <sub>2</sub>	Según Se Requiera	Según Se Requiera
Densificante	Según Se Requiera	Según Se Requiera

Fuente: Autores

Tabla 15 – Formulación de 100 % Aceite 9 lpg

Aditivos	Cantidades
Aceite diesel - Biodiesel de Soya	Según Se Requiera
Emulsificante No. 2	3.5 ml/ bbl
Controlador de filtrado No. 1	8 lpb
Emulsificante Pasivo-Humectante	1.6 ml/ bbl
Cal	6 lpb
Viscosificante	8 lpb
Densificante	Según Se Requiera

Fuente: Autores

**Tabla 16 – Corrección Formulación Biodiesel de Soya de Alto Contenido de Agua  
Relación: 50/50 O/W 9 lpg**

<b>50/50 O/W 9 lpg</b>			
<b>No</b>	<b>Formulación</b>	<b>Filtrado HPHT</b>	
		<b>Lodo</b>	<b>Rango Aceptable</b>
<b>1</b>	Base (Ver Tabla14)	13,4 ml	< 6 ml
<b>2</b>	Base + 2 lpb Controlador de filtrado No. 1	8,2 ml	< 6 ml
<b>3</b>	(2) + 2 lpb Controlador de filtrado No. 1	5,8 ml	< 6 ml

**Tabla 17 – Corrección Formulación de Alto Contenido de agua Relación: 40/60 O/W 9 lpg**

<b>40/60 O/W 9 lpg</b>		<b>Filtrado HPHT</b>	
<b>No</b>	<b>Formulación</b>	<b>Lodo</b>	<b>Rango Aceptable</b>
<b>1</b>	Base	No controla Filtración	< 6 ml
<b>2</b>	Base + 4 lpb Controlador de filtrado No. 1	No controla Filtración	< 6 ml
<b>3</b>	Base + 2,15 ml/ bbl Emulsificante No. 1 + 2 lpb Controlador de filtrado No. 2 + 0,5 lpb Cal	29,5 ml	< 6 ml
<b>4</b>	(3)+ 2 lpb Controlador de filtrado No. 2	19 ml	
<b>5</b>	(4)+ 2 lpb Controlador de filtrado No. 2	15ml	< 6 ml

Fuente: Autores

### 3.4.2. Pruebas <sup>(11)</sup>

**3.4.2.1. Prueba de Reología.** Objetivo: Determinar las lecturas del viscosímetro para calcular las siguientes propiedades de un fluido de perforación: <sup>(11)</sup>

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

Unidades:

- VP: centipoise (cP)            ▪ VA: centipoise (cP)
- YP: lb/100 ft<sup>2</sup> (kPa)          ▪ Resistencia del gel: lb/100 ft<sup>2</sup> (kPa)
- YS: lb/100 ft<sup>2</sup> (kPa)

**3.4.2.2. Densidad Balanza de Lodos Baroid.** Objetivo: Medir la densidad de un fluido de perforación. <sup>(11)</sup>

Unidades:

lb/gal, lb/ft<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>, psi/1000ft.

**3.4.2.3. 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). <sup>(11)</sup>

Unidad: ▪ ml / 30 min

**3.4.2.4. Análisis de Retorta.** Objetivo: Determinar el contenido en líquidos y sólidos de un fluido de perforación. <sup>(11)</sup>

Unidad: ▪ Porcentaje en volumen.

**3.4.2.5. Pruebas Químicas Lodos Base Aceite.** Norma API RP 13B-2  
Los resultados de las pruebas se presentan en las tablas 18 y 19.

Tabla 18. Resultado de Pruebas con Diesel

Variables	Unidades	100% Aceite	Firme 80/20	Firme 70/30	Filtrado Relajado 80/20	Filtrado Relajado 70/30	% Agua 50/50	% Agua 40/60
Ø600	lb/100 ft <sup>2</sup>	17,3	35,2	59,4	40,7	71,2	96,6	169,3
Ø300	lb/100 ft <sup>2</sup>	10,8	21,8	34,4	24,5	43,4	67	138
Ø200	lb/100 ft <sup>2</sup>	7,9	15,6	24,3	18,2	27,8	52,4	116
Ø100	lb/100 ft <sup>2</sup>	5,2	10,1	17	12,8	18	47,1	97,5
Ø6	lb/100 ft <sup>2</sup>	2,7	4,9	9,2	7,1	11,6	21	57,4
Ø3	lb/100 ft <sup>2</sup>	1,7	3,6	7,1	4,8	9,4	16,2	53,9
Resistencia Gel 10''/10'	lb/100 ft <sup>2</sup>	1/2,1	2,7/5,4	4/8,1	3,3/6,4	5/10,6	2/4	9/16
VP	cP	6,5	13,4	25	16,2	27,8	29,6	31,3
VA	cP	8,65	17,6	29,7	20,35	35,6	48,3	84,65
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	4,3	8,4	9,4	8,3	15,6	37,4	106,7
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	0,7	2,3	5	2,5	7,2	11,4	50,4
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2,8	1	1,3	2,6	2,8	3,4	3,6
Peso Lodo	lpg	9,2	9	9	9,2	9,25	9,4	9,5
Cl	mg/l	N/D	15.500	23.750	16.000	24.250	40.250	48.000
Ca	mg/l	1.600	1.400	2.100	1.600	2.300	3.700	4.400
Alcalinidad	ml	3,8	3,7	3,25	3,6	3,2	2,95	2,65
Exceso de Cal	lpg	4,92	4,79	4,21	4,66	4,14	3,82	3,43

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>	<b>100% Aceite</b>	<b>Firme 80/20</b>	<b>Firme 70/30</b>	<b>Filtrado Relajado 80/20</b>	<b>Filtrado Relajado 70/30</b>	<b>% Agua 50/50</b>	<b>% Agua 40/60</b>
<b>Salinidad</b>	<b>ppm</b>	N/D	214.257	222.422	227.634	222.731	241.901	234.744
<b>% Agua</b>	<b>% (vol)</b>	0	17,8	26	17	26,5	39,5	49
<b>% Aceite</b>	<b>%(vol)</b>	83	71,2	58	64,5	56,5	40,5	33
<b>% Sólidos</b>	<b>%(vol)</b>	17	11	16	18,5	17	20	18
<b>Relación (O/W.</b>	<b>%(vol)</b>	100	80/20	69/31	79/21	68/32	51/49	40/60
<b>Cake</b>		Consistente	Consistente	Consistente	Consistente	Consistente	Inconsistente	Consistente
		Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica
<b>32avos pulgada</b>		<<1	<1	1	<2	2	<1	Película De Torta

Tabla 19. Resultado De Pruebas con Biodiesel De Soya

Variables	Unidades	100% Aceite	Firme 80/20	Firme 70/30	Filtrado Relajado 80/20	Filtrado Relajado 70/30	% Agua 50/50	% Agua 40/60
Ø600	lb/100 ft <sup>2</sup>	22	36,21	62,5	42,3	72,5	101,3	314,3
Ø300	lb/100 ft <sup>2</sup>	12,2	23,7	35,1	26,7	44,4	68,8	-
Ø200	lb/100 ft <sup>2</sup>	8,3	16,7	24,5	19,3	29,9	57,9	-
Ø100	lb/100 ft <sup>2</sup>	4,6	11,7	18,8	13,7	19,4	47,4	-
Ø6	lb/100 ft <sup>2</sup>	1,7	2,7	10	8,2	13,3	13,1	-
Ø3	lb/100 ft <sup>2</sup>	1,3	2,4	8	5,7	10,8	9,5	-
Resistencia Gel 10''/10'	lb/100 ft <sup>2</sup>	2,1/4,3	3,3/6,1	4,7/9,5	3/6	4/8	2,6/5,2	30/32
VP	cP	9,8	12,51	27,4	15,6	28,1	32,5	-
VA	cP	11	18,105	31,25	21,15	36,25	50,65	157,15
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	2,4	11,19	7,7	11,1	16,3	36,3	-
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	0,9	2,1	6	3,2	8,3	5,9	-
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	3,5	2	2,3	3	3,2	5,8	15
Peso Lodo	lpg	9	9	9,2	9,2	9,1	9,5	>10
Cl	mg/l	N/D	15.750	24000	16.250	24.500	40.500	49.000
Ca	mg/l	1.800	1.500	2.200	1.700	2.400	3.800	4.500
Alcalinidad	ml	3,65	3,55	3,15	3,4	3,1	2,8	2,5
Exceso de Cal	lpb	4,73	4,60	4,08	4,40	4,01	3,63	3,24

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>	<b>100% Aceite</b>	<b>Firme 80/20</b>	<b>Firme 70/30</b>	<b>Filtrado Relajado 80/20</b>	<b>Filtrado Relajado 70/30</b>	<b>% Agua 50/50</b>	<b>% Agua 40/60</b>
<b>Salinidad</b>	<b>ppm</b>	N/D	224.877	224.238	220.394	242.233	236.247	254.275
<b>% Agua</b>	<b>% (vol)</b>	0	17	26	18	24	41	45
<b>% Aceite</b>	<b>%(vol)</b>	86	68	57	69	56	42	31
<b>% Sólidos</b>	<b>%(vol)</b>	14	15	17	13	20	17	24
<b>Relación (O/W.</b>	<b>%(vol)</b>	100	80/20	69/31	79/21	70/30	51/49	41/59
<b>Cake</b>		Consistente	Consistente	Consistente	Consistente	Consistente	Consistente	Inconsistente
		Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Plástica	Quebradiza
<b>32avos pulgada</b>		<<1	<1	<1	<<1	Película De Torta	<<1	2

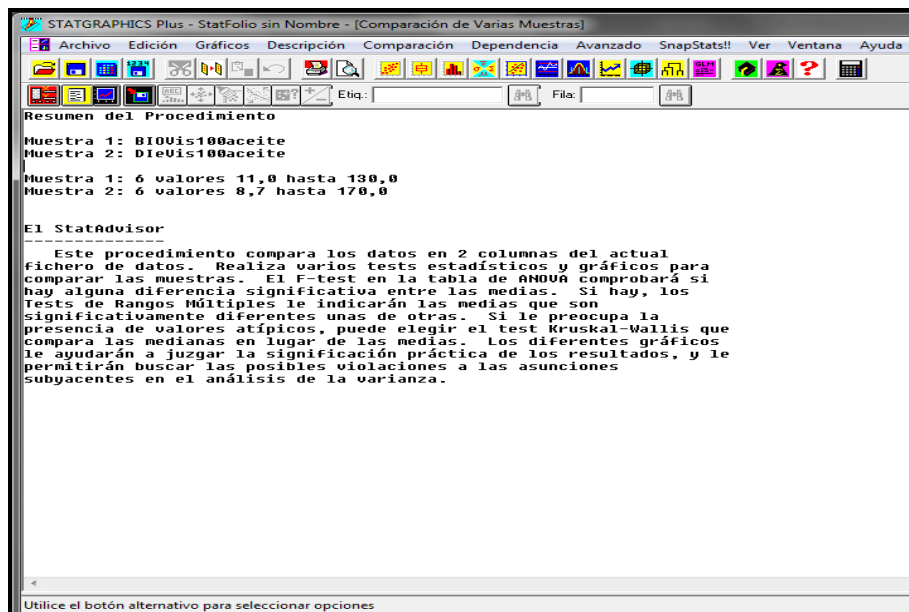
## **4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1. ANÁLISIS DE DATOS EN EL PROGRAMA ESTADÍSTICO STATGRAPHICS PLUS 5.1**

A continuación en las figuras 15 a 22 se muestra el análisis de resultados obtenidos con la implementación de la herramienta estadística Statgraphics, para la formulación: 100% Diesel y Biodiesel de Soya Diesel. Este mismo análisis se realizó para cada una de las formulaciones, la tabla 20 muestra un resumen de todo el análisis estadístico aplicado a cada formulación.

En el siguiente análisis de datos se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos son observaciones muestrales y no quiere decir que un grupo de datos presente el mismo comportamiento. Para ello se debe recurrir a métodos estadísticos inferenciales como la prueba ANOVA.

Figura 15. Resumen Del Procedimiento Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya



Fuente: Statgraphics

Figura 16. Resumen Estadístico Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya

**Resumen Estadístico**

	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación típica	Mínimo
BIOvis100aceite	6	44,0833	2616,3	51,1498	11,0
DieVis100aceite	6	58,6667	5410,33	73,5549	8,7
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>51,375</b>	<b>3706,47</b>	<b>60,8808</b>	<b>8,7</b>
	Máximo	Rango	Asimetría tipi.	Curtosis típificada	
BIOvis100aceite	130,0	119,0	1,2886	0,0124323	
DieVis100aceite	170,0	161,3	1,06156	-0,64636	
<b>Total</b>	<b>170,0</b>	<b>161,3</b>	<b>1,5647</b>	<b>-0,371775</b>	

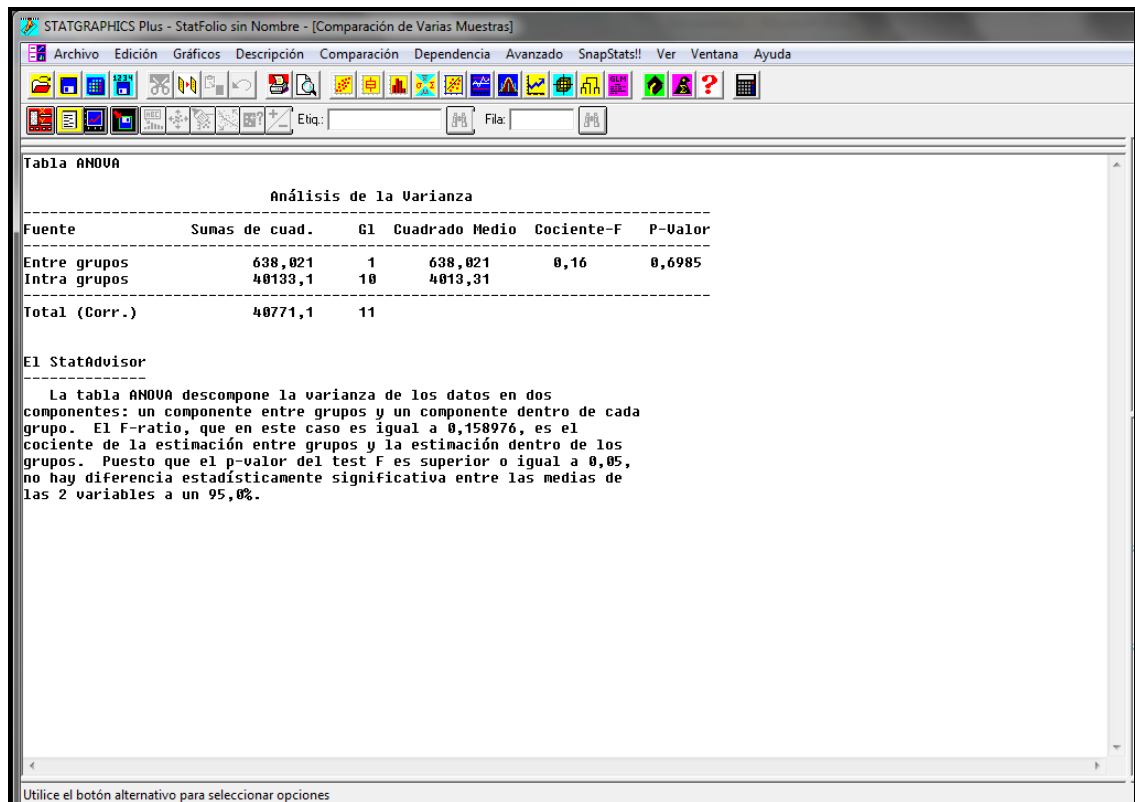
**El StatAdvisor**

Esta tabla muestra varios estadísticos para cada una de las 2 columnas de datos. Para comprobar las diferencias significativas entre las medias de las columnas, seleccione Análisis de la Varianza de la lista de Opciones Tabulares. Seleccione Gráfico de Medias de la lista de Opciones Gráficas para mostrar gráficamente las medias.

Fuente: Statgraphics

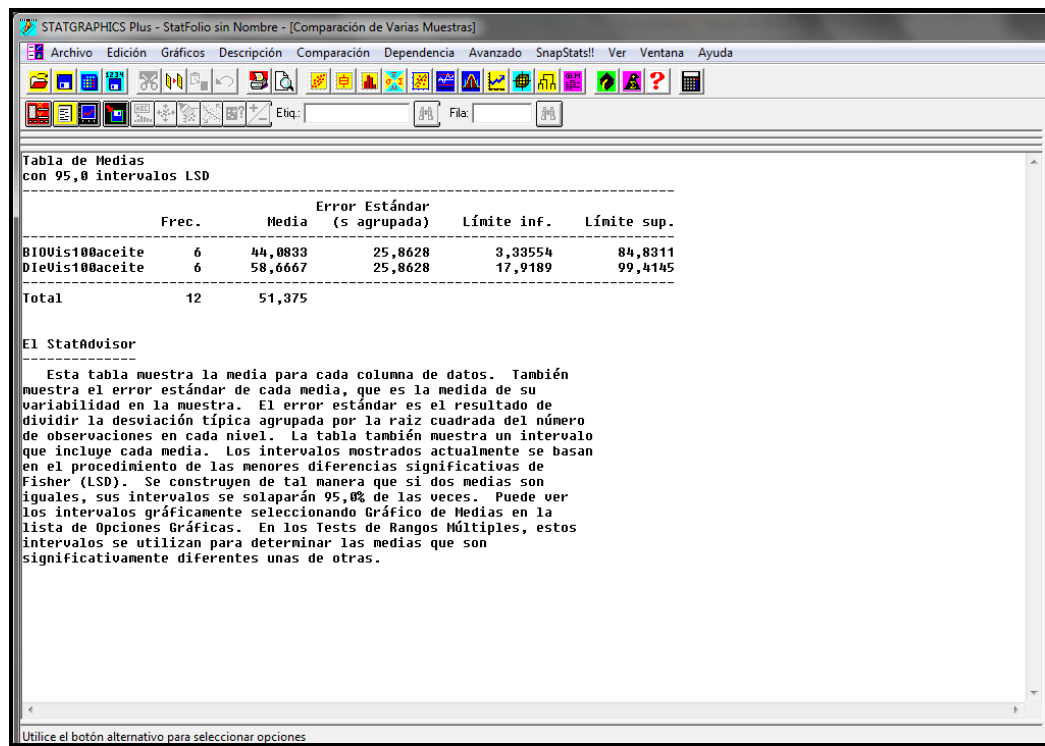
El siguiente análisis de varianza parte del hecho de que se utilizan cocientes de varianzas para probar la hipótesis de igualdad de medias. La intención de esta técnica es separar la variación total en dos partes: la variabilidad debida a los tratamientos y debida al error. Cuando la primera predomina notoriamente sobre la segunda es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto, es decir, las medias son diferentes. Cuando los tratamientos contribuyen igual o menos que el error, se concluye que las medias son iguales.

Figura 17. Tabla ANOVA Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya.



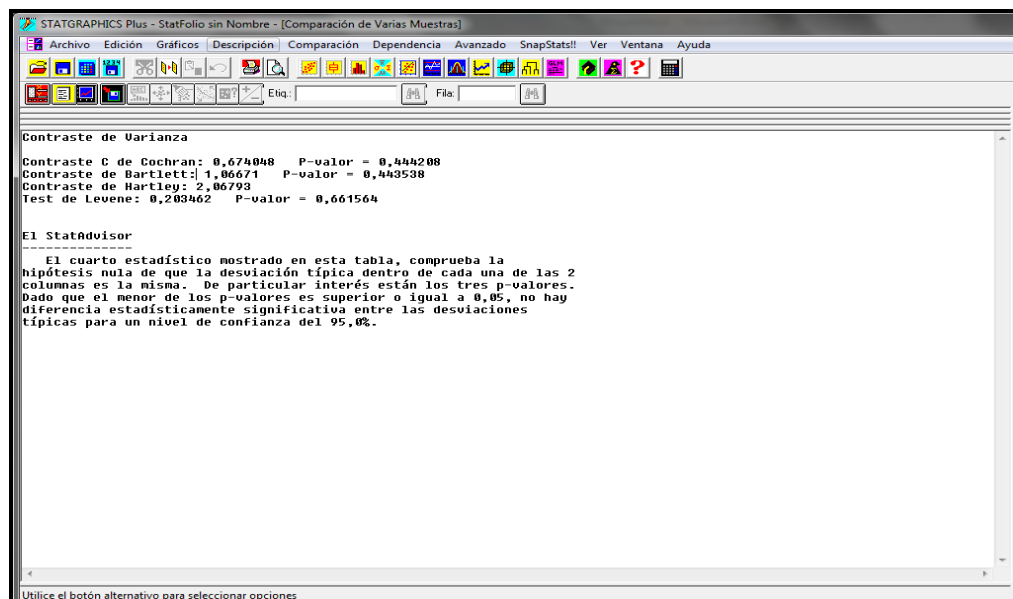
Fuente: Statgraphics

**Figura 18. Tabla De Medias Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya.**



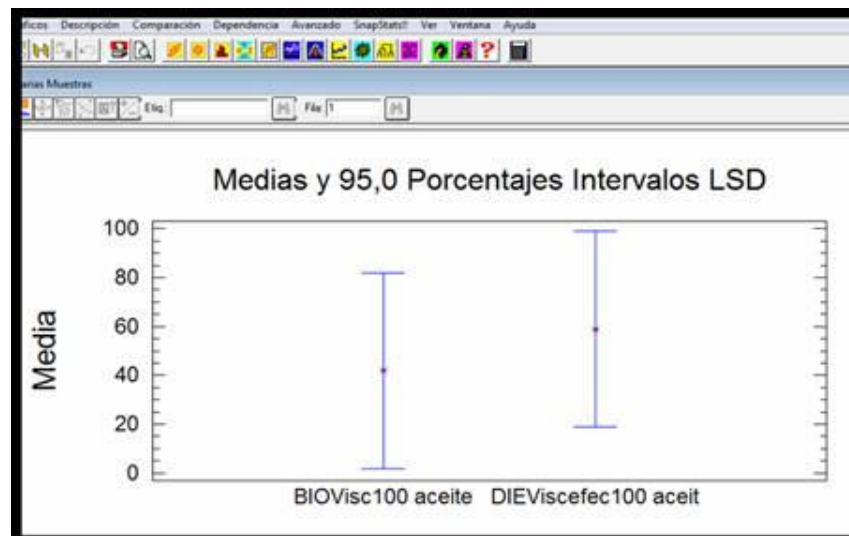
Fuente: Statgraphics

**Figura 19: Contraste de Varianza Para los Valores de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya**



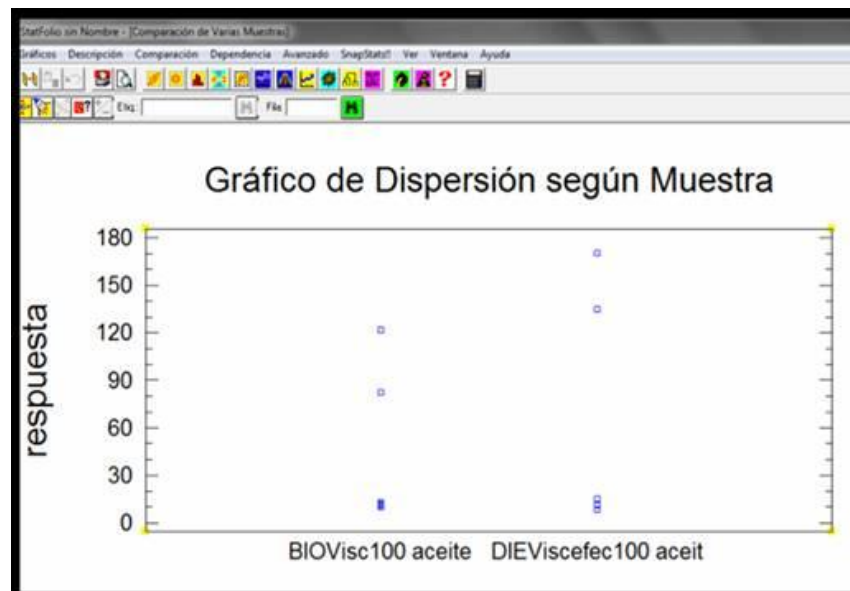
En el siguiente grafico LSD (Least Significant Diference), se puede observar que las medias de la formulación 100% aceite Biodiesel y la formulación 100% aceite Diesel D2 no son diferentes estadísticamente.

**Figura 20. LSD (least significant diference),**



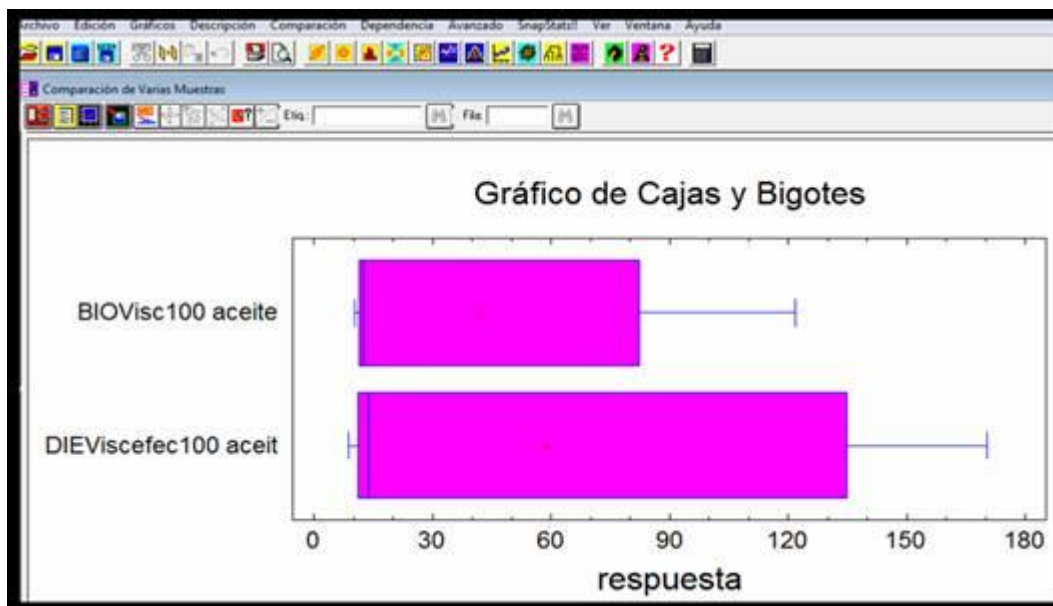
Fuente: Statgraphics

**Figura 21: Grafico de Dispersión según muestra de la formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya**



Fuente: Statgraphics

Figura 22: Gráfico de Cajas y Bigotes según formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya



Fuente: Statgraphics

A continuación se muestra una serie de tablas, en las cuales se resume todo el análisis estadístico aplicado a cada formulación.

Tabla 20. Resumen Estadístico

RESUMEN ESTADISTICO									
MUESTRAS	MAXIMO	RANGO	ASIMETRIA	CURTOSIS	FRECUENCIA	MEDIA	VARIANZA	DESVIACION TIPICA	MINIMO
BIOEsf100aceite	22	20,7	1,17443	0,497117	6	8,35	61,827	7,86301	1,3
DIEsft100aceite	17,3	15,6	0,929158	0,177332	6	7,6	33,8	5,81378	1,7
TOTAL	22	20,7	1,42951	0,233169	12	7,975	43,6202	6,60456	1,3
BIOEsfirme8020	36,21	33,81	0,661013	-0,156636	6	15,5683	169,489	13,0188	2,4
DIEsftirme8020	35,2	31,6	0,974551	0,202989	6	15,2	142,076	11,9196	3,6
TOTAL	36,21	33,81	0,955207	-0,434332	12	15,3842	141,658	11,902	2,4
BIOEsfirme7030	62,5	54,5	1,3069	0,802699	6	26,4833	409,55	20,2373	8
DIEsftirme7030	59,4	52,3	1,20979	0,605183	6	25,2333	381,187	19,524	7,1
TOTAL	62,5	55,4	1,50031	0,121189	12	25,8583	359,852	18,9698	7,1
BIOEsfRelajado8020	42,3	36,6	1,01232	0,28943	6	19,3167	184,658	13,5889	5,7
DIEsftRelajado8020	40,7	35,9	1,05678	0,4187	6	18,0167	175,534	13,2489	4,8
TOTAL	42,3	37,5	1,22824	-0,165681	12	18,6667	164,184	12,8134	4,8
BIOEsfRelajado7030	72,5	61,7	1,21956	0,471801	6	31,7167	551,166	23,4769	10,8
DIEsftRelajado7030	71,2	61,8	1,22275	0,451358	6	30,2333	557,687	23,6154	9,4
TOTAL	72,5	61,8	1,41823	0,121153	12	30,975	485,675	22,6543	9,4
BIOEsfAltoagua5050	101,3	91,8	0,224271	-0,348159	6	49,6667	1211,1	34,8008	9,5
DIEsftAltoagua5050	96,6	80,4	0,478041	-0,129904	6	50,05	891,631	29,8602	16,2
TOTAL	101,3	91,8	0,381192	-0,601729	12	49,8583	955,826	30,9164	9,5

Fuente: Autores

**Tabla 21. Análisis de Varianza (ANOVA)**

ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)						
FORMULACION	FUENTE	SUMAS DE CUADRADOS	GI	CUADRADO MEDIO	COCIENTE-F	P-VALOR
100% ACEITE	ENTRE GRUPOS	1,6875	1	1,6875	0,04	0,8547
	INTRA GRUPOS	478,135	10	47,8135		
	TOTAL(CORR.)	479,822	11			
FIRME 80/20	ENTRE GRUPOS	0,407008	1	0,407008	0	0,9602
	INTRA GRUPOS	1557,83	10	155,783		
	TOTAL(CORR.)	1558,23	11			
FIRME 70/30	ENTRE GRUPOS	4,6875	1	4,6875	0,01	0,9154
	INTRA GRUPOS	3953,68	10	395,368		
	TOTAL(CORR.)	3958,37	11			
FILTRO RELAJADO 80/20	ENTRE GRUPOS	5,07	1	5,07	0,03	0,8701
	INTRA GRUPOS	1800,96	10	180,096		
	TOTAL(CORR.)	1806,03	11			
FILTRO RELAJADO 70/30	ENTRE GRUPOS	6,60083	1	6,60083	0,01	0,9153
	INTRA GRUPOS	5544,26	10	554,426		
	TOTAL(CORR.)	5550,86	11			
ALTO CONT AGUA 50/50	ENTRE GRUPOS	0,440833	1	0,440833	0	0,9841
	INTRA GRUPOS	10513,6	10	1051,36		
	TOTAL(CORR.)	10514,1	11			

Fuente: Autores

Como podemos ver en la tabla 21 que debido a que el *P-Valor*  $\geq 0.05$ , no se rechaza la hipótesis nula, ya que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias y por lo tanto se puede concluir que cualquiera de las formulaciones se puede usar con un grado de confianza del 95%.

**Tabla 22. Medias (con 95,0 de intervalos LSD)**

TABLA DE MEDIAS (CON 95,0 DE INTERVALOS LSD)					
MUESTRAS	FRECUENCIA	MEDIA	S AGRUPADA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
BIOEsf100aceite	6	8,35	2,82293	3,90238	12,7976
DIEsft100aceite	6	7,6	2,82293	3,15238	12,0476
TOTAL	12	7,975			
BIOEsFirme8020	6	15,5683	5,09547	7,54025	23,5964
DIEsftFirme8020	6	15,2	5,09547	7,17191	23,2281
TOTAL	12	15,3842			
BIOEsFirme7030	6	26,4833	8,11755	13,6938	39,2728
DIEsftFirme7030	6	25,2333	8,11755	12,4438	38,0228
TOTAL	12	25,8583			
BIOEsfRelajado8020	6	19,3167	5,47868	10,6848	27,9485
DIEsftRelajado8020	6	18,0167	5,47868	9,38481	26,6485
TOTAL	12	18,6667			
BIOEsfRelajado7030	6	31,7167	9,61272	16,5715	46,8618
DIEsftRelajado7030	6	30,2333	9,61272	15,0882	45,3785
TOTAL	12	30,975			
BIOEsfAltoagua5050	6	49,6667	13,2374	28,8107	70,5226
DIEsftAltoagua5050	6	50,05	13,2374	29,1941	70,9059
TOTAL	12	49,8583			

Fuente: Autores

Luego como se muestra en la tabla 22 se prueba la igualdad de todos los posibles pares de medias con la hipótesis, esto se logra mediante el método LSD diferencia mínima significativa (Least Significant Difference), ya que es la diferencia mínima que debe haber entre dos medias muestrales para poder considerar que los tratamientos son significativamente diferentes.

En este análisis se observa que no hay diferencias significativas entre todos los pares de medias.

**Tabla 23. Contraste De Varianza**

CONTRASTE DE VARIANZA							
FORMULACION	CONTRASTE C DE COCHRAN	P-VALOR	CONTRASTE DE BARTLETT	P-VALOR	CONTRASTE DE HARTLEY	TEST DE LEVENE	P-VALOR
100% ACEITE	0,646543	0,523545	1,04593	0,522858	1,8292	0,321543	0,583186
FIRME 80/20	0,543993	0,851229	1,00389	0,850916	1,19295	0,0540974	0,820772
FIRME 70/30	0,517935	0,939168	1,00064	0,939023	1,07441	0,00011518	0,991648
F. R. 80/20	0,512665	0,957033	1,00032	0,956924	1,05198	0,0047742	0,946276
F. R. 70/30	0,50294	0,99004	1,00002	0,989996	1,01183	3,1976E-06	0,998608
A. C. A. 50/50	0,575965	0,74506	1,01175	0,744569	1,3583	0,163934	0,694086

Fuente: Autores

En la tabla 23 se muestra un chequeo de la varianza en el cual podemos observar que en la prueba de Cochran's C y en la de Bartlett, el *P-valor* es superior a 0.05, por lo tanto no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar en el nivel de confianza del 95.0%.

En la prueba de Hartley, se pone a prueba la hipótesis nula de que las desviaciones estándar de cada formulación dentro de cada una de las tasas de corte es el mismo. Y según la prueba de Leven's, el *P-valor* es superior a 0,05, esto quiere decir que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar en el nivel de confianza del 95.0%

**Tabla 24. VALORES P**

VALORES P							
VARIABLE	100% ACEITE	FIRME 80/20	FIRME 70/30	RELAJADO 80/20	RELAJADO 70/30	ALTO AGUA 50/50	ALTO AGUA 40/60
VISCOSIDAD	0,6985	0,6151	0,9009	0,8489	0,8748	0,5907	0,2154
ESFUERZO	0,8547	0,9602	0,9154	0,8701	0,9153	0,9841	----

Fuente: Autores

El menor *P-valor* de entre las pruebas realizadas es igual a 0,5907 como podemos observar en la tabla 24. Debido a que el *P-valor* para esta prueba es mayor a 0.05, no podemos rechazar la idea de que los residuos proceden de una distribución normal con un 95% o más de confianza.

En cuanto al análisis estadístico de las muestras se puede concluir que no hay diferencias estadísticamente significativas ( $P \geq 0.05$ ) entre las medias de las lecturas de viscosidad y esfuerzo cortante (IC 95%) para cada una de las formulaciones del biodiesel y diesel, exceptuando la de alto contenido de agua 40/60. Es posible que el alto contenido de agua en la formulación afecte negativamente el lodo ya que presenta un fluido muy viscoso y por esto las propiedades no pueden ser medidas, perjudicando así las mediciones de las

variables de respuesta. Por lo anterior, se puede seleccionar cualquier formulación de lodo, recomendando la de fase continua Biodiesel a Base de Soya por la reducción económica en cuanto a tratamientos de cortes y de Aguas en comparación con el diesel, exceptuando la de alto contenido de agua 40/60 ya que no arrojo resultados favorables usando el biodiesel.

## 4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presenta los resultados detallados para cada formulación (Tablas 25-45) y sus respectivas (Figuras 23-43)

**Tabla 25. Reología de la Formulación 100 % Aceite**

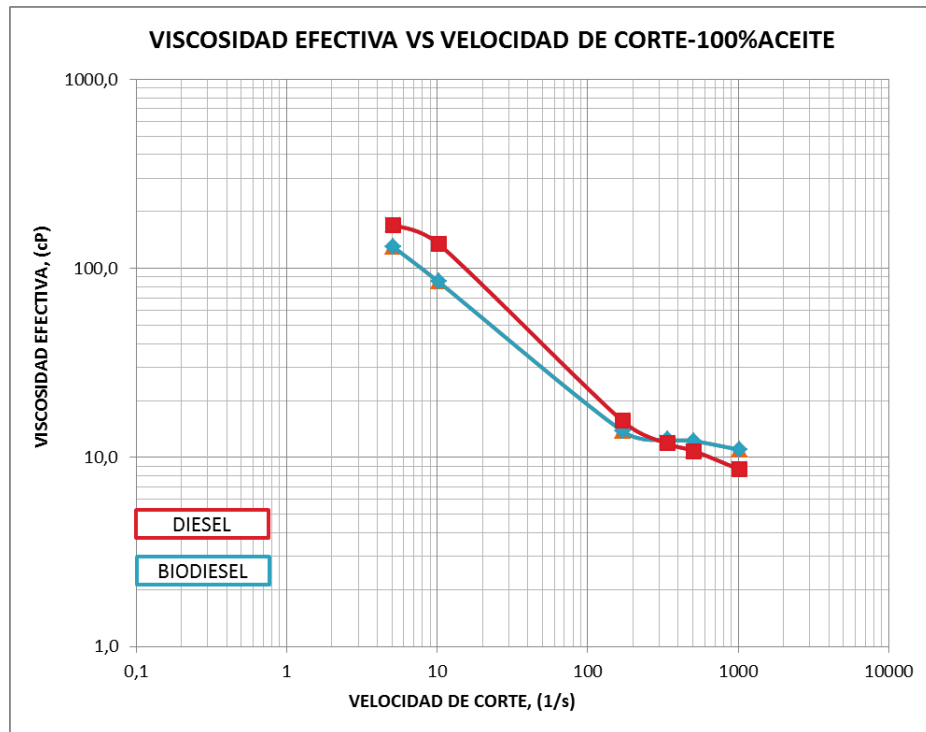
DIESEL No.2				Biodiesel de Soya			
RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,38	17,3	8,7	600	1021,38	22	11,0
300	510,69	10,8	10,8	300	510,69	12,2	12,2
200	340,46	7,9	11,9	200	340,46	8,3	12,5
100	170,23	5,2	15,6	100	170,23	4,6	13,8
6	10,21	2,7	135	6	10,21	1,7	85
3	5,11	1,7	170	3	5,11	1,3	130

**Tabla 26. Propiedades de la Formulación 100 % Aceite**

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL SOYA
Resistencia Gel		1/2,1	2,1/4,3
VP	cP	6,5	9,8
VA	cP	8,65	11
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	4,3	2,4
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	0,7	0,9

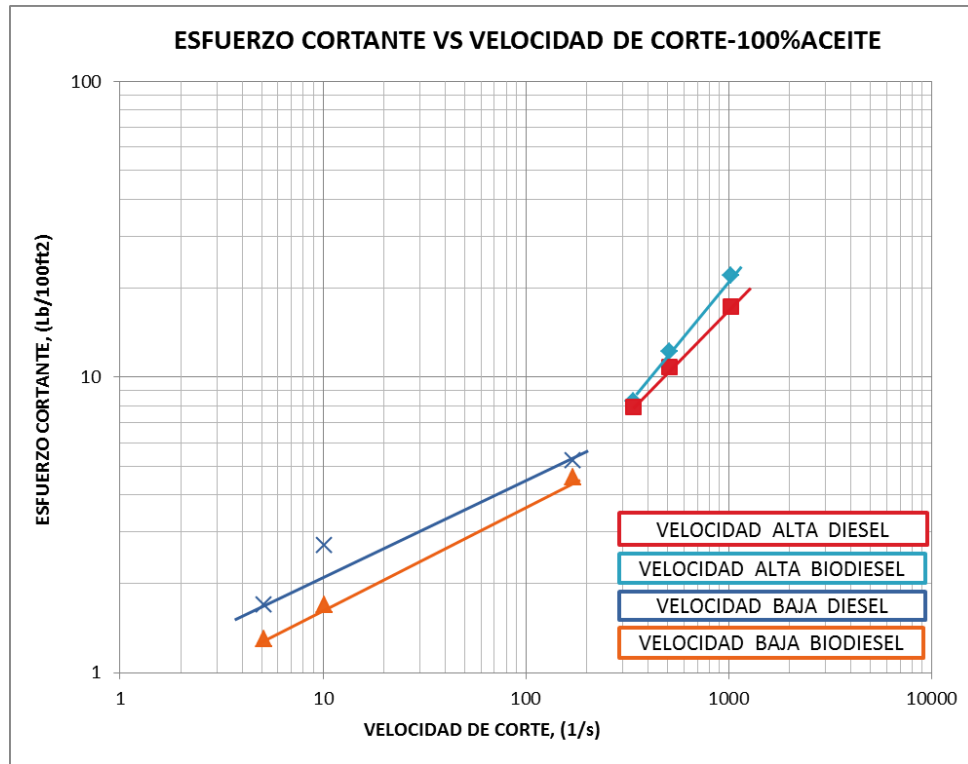
HPHT 300 °F y 500	ml	2,8	3,5
Peso Lodo	lpg	9,2	9
% Agua	%(vol)	0	0
% Aceite	%(vol)	83	86
% Sólidos	%(vol)	17	14
Relación (O/W)	%(vol)	100	100
Cake		Consistente	Consistente
		Plástica	Plástica
	32avos	<<1	<<1

Figura 23. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite

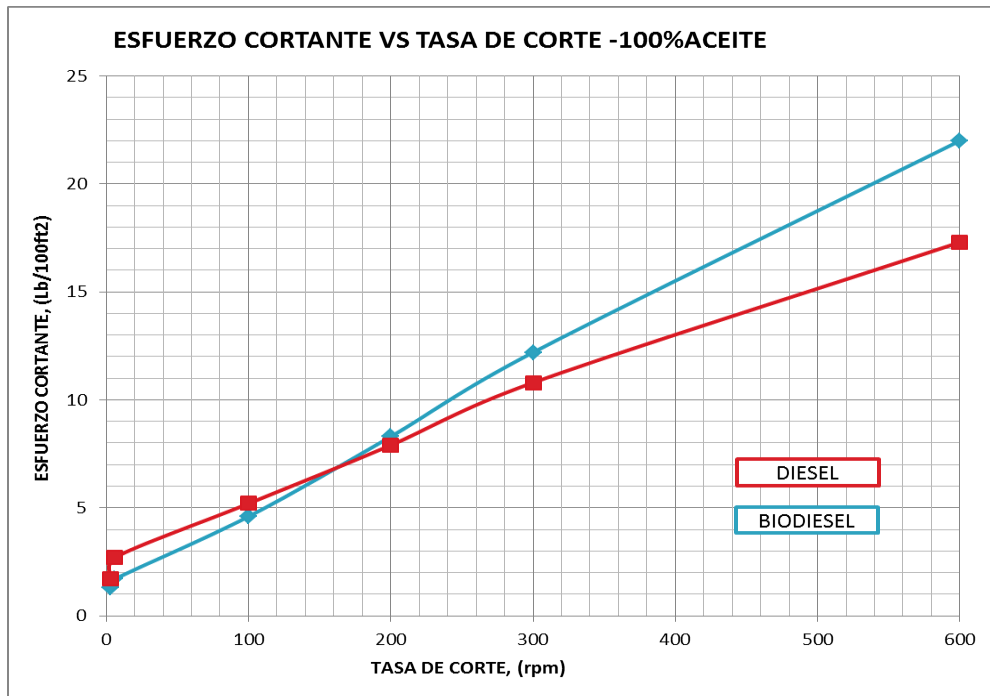


Fuente: Autores

**Figura 24. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite**



**Figura 25. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte 100 % Aceite**



La relación numérica entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de un fluido en un gráfico "log/log". Este valor describe el grado de comportamiento adelgazante por corte de un fluido.

$$n = \frac{\log(R1 / R2)}{\log(V1 / V2)}$$

Donde:

R1= lectura del dial a rpm1

R2= lectura del dial a rpm2

V1 y V2 = Velocidad de corte en s<sup>-1</sup>

$$np = 3,32 \times \log \frac{\text{lect 600 rpm}}{\text{lect 300 rpm}}$$

$$na = 0,657 \log \times \frac{\text{lect 100 rpm}}{\text{lect 3 rpm}}$$

$$Kp = 1,07 \times \frac{\text{lect 600 rpm}}{1022^{np}}$$

$$Ka = 1,07 \times \frac{\text{lect 3 rpm}}{5,11^{na}}$$

$n_p$  = Valor índice de la ley de la potencia en la tubería de perforación

$n_a$  = Valor índice de la ley de la potencia en el espacio anular

$k_p$  = Valor índice de consistencia en la tubería de perforación en lb/100 ft<sup>2</sup>

$k_a$  = Valor índice de consistencia en el espacio anular en lb/100 ft<sup>2</sup>

**Tabla 27. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación 100 % Aceite**

<b>Fase</b>	<b><math>n_p</math></b>	<b><math>n_a</math></b>	<b><math>k_p</math></b>	<b><math>k_a</math></b>
<b>Diesel</b>	0,68	0,32	0,17	1,08
<b>Biodiesel</b>	0,85	0,36	0,07	0,77
<b>Soya</b>				

La tabla 25, muestra que la relación de esfuerzo de corte a velocidad de corte no es constante, sino diferente a cada velocidad de corte. Esto significa que es un fluido no newtoniano. Además se tratan de fluidos pseudo plásticos puesto que las viscosidades efectivas disminuyen con el incremento de las velocidades de corte.

En relación con los resultados de acuerdo con los datos de la tabla 26, Los valores de la resistencia de gel se encuentran dentro del rango de geles favorables para ambas formulaciones Diesel y Biodiesel de soya; puesto que se presentan valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos. No obstante los esfuerzos de gel para la formulación de Biodiesel de Soya, sugieren mayor capacidad para suspender el material densificante y los recortes.

Los valores de viscosidad plástica son bajos para ambas formulaciones Diesel y Biodiesel de soya, fuera del rango de valores teóricos generalmente establecidos para la perforación de pozos ( $VP = 12 - 45$  cP); sin embargo el valor de viscosidad plástica de la formulación Biodiesel de Soya es mas elevado en

relación con la formulación de Diesel, acercándose mas a los valores comunes de esta propiedad, por ende la formulación con Biodiesel de Soya indica mayor cualidad para optimizar la hidráulica de la Broca y las velocidades de penetración.

Por su parte se presentaron en ambas formulaciones y en especial la formulada con Biodiesel de Soya, bajos valores de Punto cedente (YP). Estos bajos valores de punto cedente son un indicativo del poco poder de acarreo de ripios que poseen estos lodos, através del espacio anular en condiciones dinámicas y por ende que estos brindan una inadecuada limpieza del pozo.

De igual forma para ambas formulaciones 100% aceite base Diesel y Biodiesel de Soya, los valores de pérdida de filtrado reportaron valores dentro de los rangos permisibles en lodos de perforación base aceite (< 6 ml), ofreciendo mayor control de filtración los formulados con Diesel como fase continúa .

Cabe destacar que al recibir el filtrado de ambas formulaciones no se evidenció la separación de las fases, ni la sedimentación de sólidos, factor de vital importancia en la estabilidad de la emulsión y no se observo presencia de agua.

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 de Soya, hecho que fue demostrado en las pruebas de compatibilidad.

Con respecto al valor de la Relación (O/W) en ambas formulaciones se permite verificar la eficiencia del balance de masa, además se pudo conseguir las fracciones volumétricas 100% aceite (sin agua) en la prueba de retorta, que es el resultado del buen proceso de mezclado de los aditivos.

Entre los Cake no se encontró diferencias: son consistentes, plásticos de espesores menores a 1/32 pulgada. Estas tortas están constituidas por sólidos bien escogidos que al ser sometidos a una presión diferencial disminuyen la permeabilidad y por consiguiente reducen la pérdida de fluido.

Para que exista invasión de filtrado, debe haber una presión diferencial hacia las formaciones. Una formación permeable tiene la capacidad de permitir que el flujo pase a través de ella.

En la figura 23. Viscosidad efectiva vs Velocidad de Corte 100 %. Se ilustra para ambas formulaciones (Diesel y Biodiesel) el comportamiento pseudoplástico ideal en un lodo de perforación, el cual está muy bien definido en altas velocidades de corte, con mejor comportamiento de la formulación que usa Diesel como fase continúa; dicho lodo disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte hasta alcanzar valores bajos de viscosidad, en la columna de perforación y a través de la broca (si este se emplea en la perforación de un pozo). De igual forma para velocidades de corte medias y bajas donde también la formulación base Diesel tiene una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo en el espacio anular. Con respecto a lo antes planteado este caso es más efectivo el lodo base Diesel para operaciones de corazonamiento, sin embargo el lodo base Biodiesel de Soya puede realizar esta operación debido a la poca diferencia de sus viscosidades.

En la Figura 24. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite y la tabla 27 en la cual se ven los resultados de  $n$  y  $k$ ; se observa que los índices de la ley de la potencia y de consistencia a velocidades bajas para el lodo base Biodiesel de Soya presentan mejores propiedades que los lodos base Diesel. Dado que dicho lodo presenta menor índice de "n", y valor alto de  $k$ ; mejorando la eficacia con la cual el fluido limpia el pozo y suspende los materiales densificantes. A su vez se interpreta que los índices de la ley de la potencia y de consistencia a velocidades medias para el lodo base Diesel presentan mejores propiedades que los lodos base Biodiesel de soya.

En relación con la Figura 25. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte 100 % Aceite, es importante destacar que las lecturas tomadas  $\theta 600$  a  $\theta 200$  están simulando el flujo dentro de la tubería y para las lecturas  $\theta 100$  a  $\theta 3$  el flujo en el espacio anular. Para ambas formulaciones se compara el comportamiento con tendencia lineal que no llega al origen con el modelo modelo de Bingham el cual forma una línea recta. Por eso puede decirse que en la zona de flujo en la tubería el modelo Bingham simula muy bien a los valores reales, sin embargo en la zona de flujo en el espacio anular los valores arrojados en este modelo son mucho más altos que los valores reales.

**Tabla 28. Reología de la Formulación de emulsión firme 80/20**

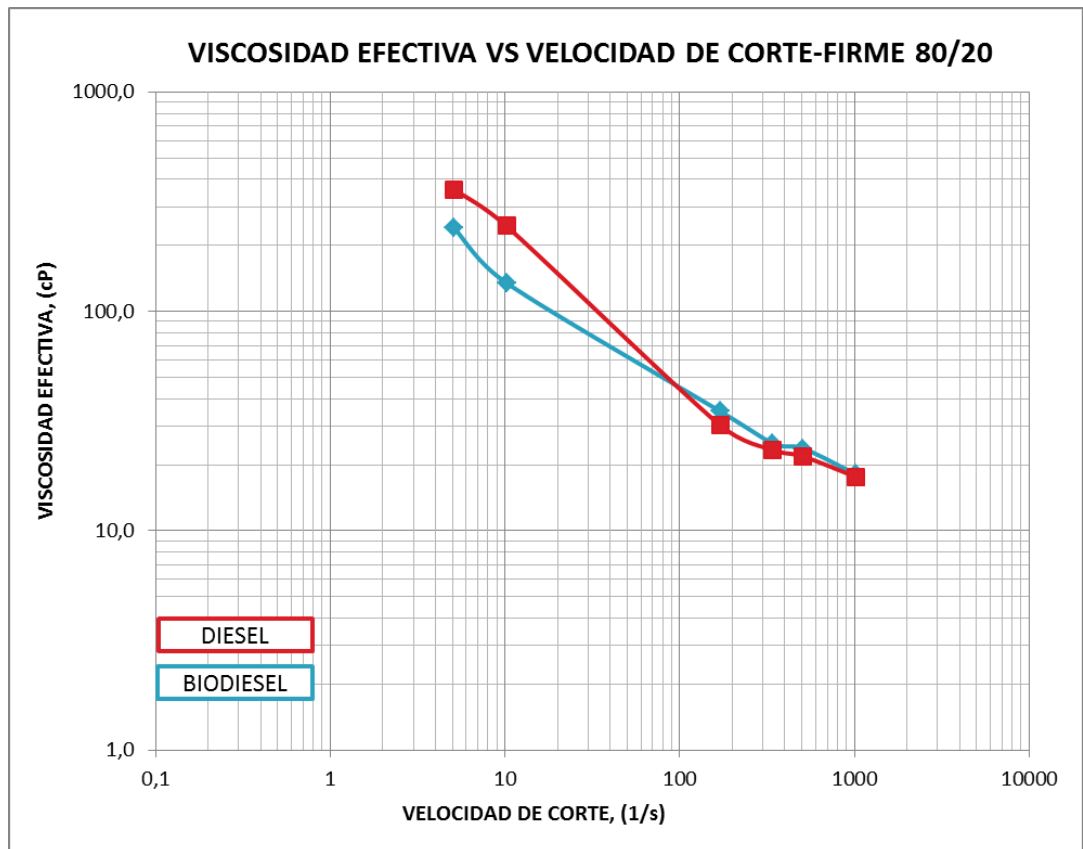
DIESEL No.2				Biodiesel de Soya			
RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,38	35,2	17,6	600	1021,38	36,21	18,1
300	510,69	21,8	21,8	300	510,69	23,7	23,7
200	340,46	15,6	23,4	200	340,46	16,7	25,1
100	170,23	10,1	30,3	100	170,23	11,7	35,1
6	10,21	4,9	245	6	10,21	2,7	135
3	5,11	3,6	360	3	5,11	2,4	240

**Tabla 29. Propiedades de la Formulación Emulsión firme 80/20**

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL SOYA
Resistencia Gel		2,7/5,4	3,3/6,1
VP	cP	13,4	12,51
VA	cP	17,6	18,10
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	8,4	11,19
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	2,3	2,1
HPHT 300 °F y 500	ml	1	2
Peso Lodo	lpg	9	9

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL SOYA
% Agua	%(vol)	17,8	17
% Aceite	%(vol)	71,2	68
% Sólidos	%(vol)	11	15
Relación (O/W)	%(vol)	80/20	80/20
Cake		Consistente	Consistente
		Plástica	Plástica
	32avos	<1	<1

Figura 26. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Emulsión firme 80/20



Fuente: Autores

Figura 27. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Emulsión firme 80/20

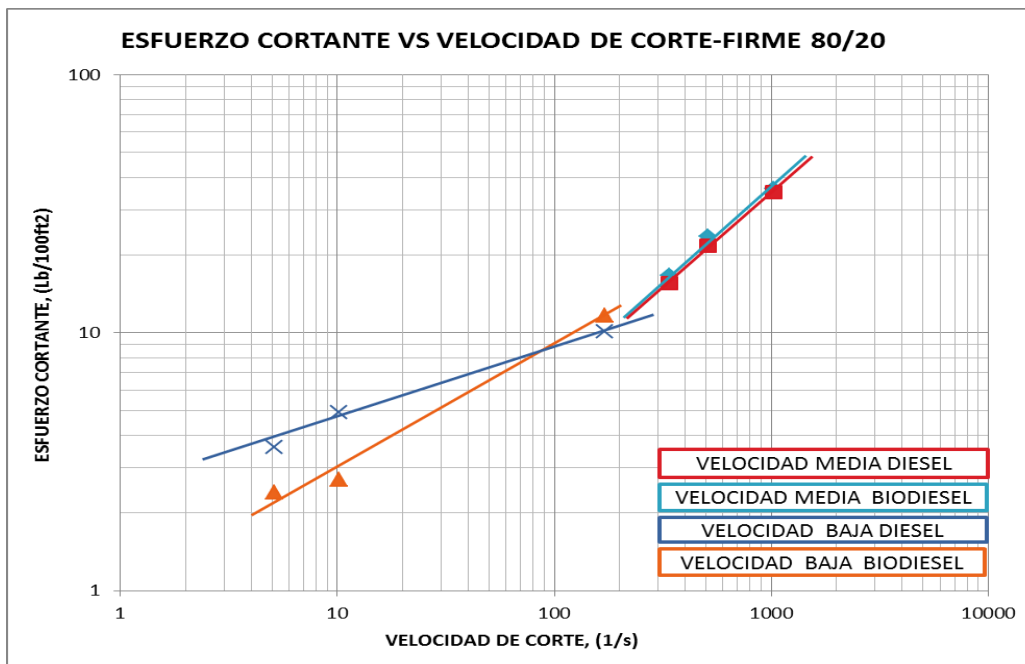
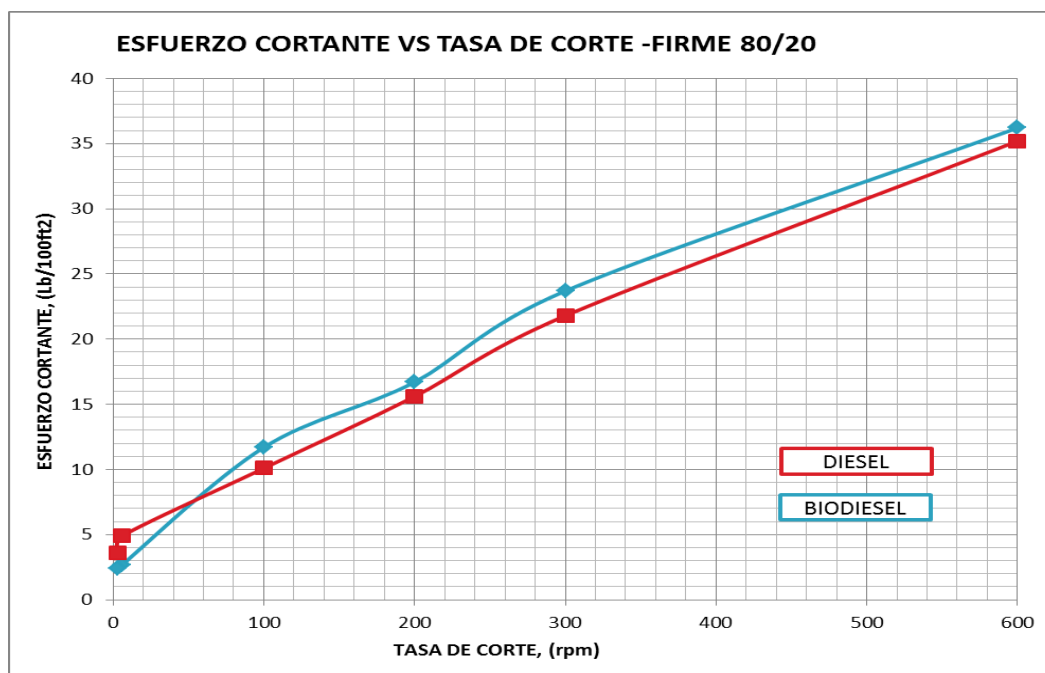


Figura 28. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Emulsión firme 80/20



**Tabla 30. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Emulsión firme 80/20**

Fase	$n_p$	$n_a$	$k_p$	$k_a$
Diesel	0,69	0,29	0,31	2,38
Biodiesel Soya	0,61	0,45	0,56	1,23

**Tabla 31. Reología de la Formulación de Emulsión Firme 70/30**

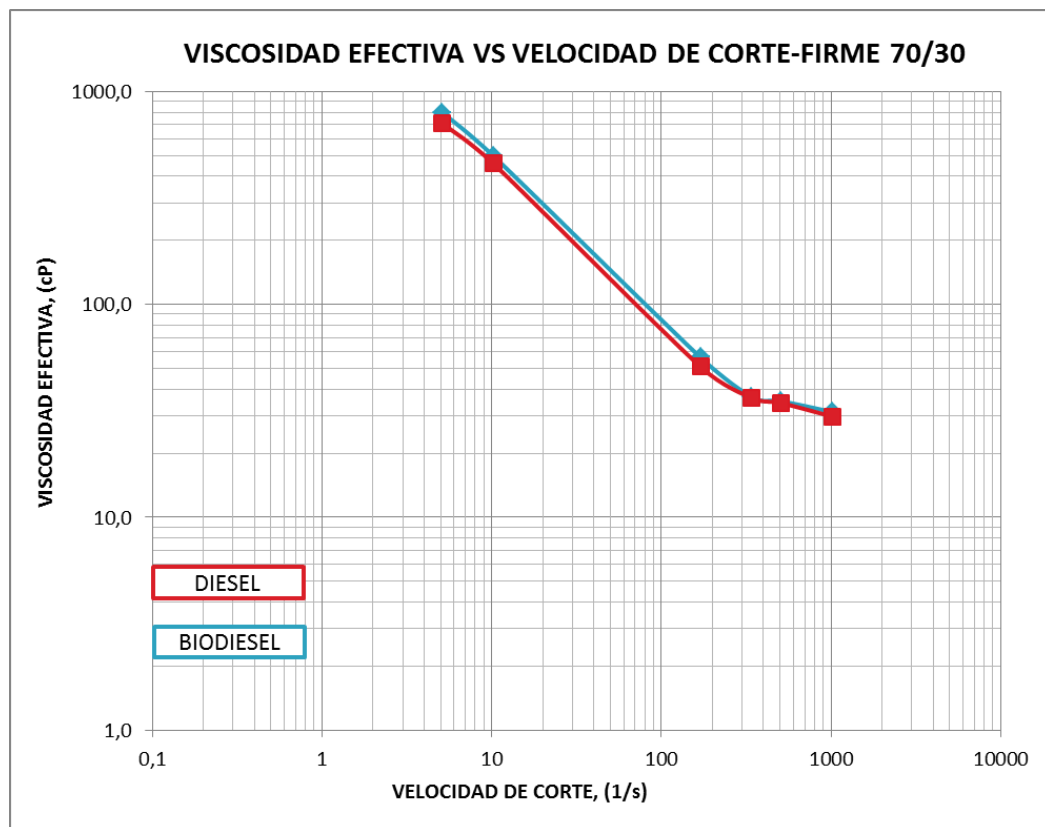
DIESEL No.2				Biodiesel de Soya			
RPM	$v$ (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	$v$ (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,38	59,4	29,7	600	1021,38	62,5	31,3
300	510,69	34,4	34,4	300	510,69	35,1	35,1
200	340,46	24,3	36,5	200	340,46	24,5	36,8
100	170,23	17	51	100	170,23	18,8	56,4
6	10,21	9,2	460	6	10,21	10	500
3	5,11	7,1	710	3	5,11	8	800

**Tabla 32. Propiedades de la Formulación de Emulsión Firme 70/30**

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL
Resistencia Gel		4/8,1	4,7/9,5
VP	cP	25	27,4
VA	cP	29,7	31,25
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	9,4	7,7
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	5	6
HPHT 300 °F y 500	ml	1,3	2,3
Peso Lodo	lpg	9	9,2

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL
% Agua	%(vol)	26	26
% Aceite	%(vol)	58	57
% Sólidos	%(vol)	16	17
Relación (O/W)	%(vol)	69/31	69/31
Cake		Consistente	Consistente
		Plástica	Plástica
	32avos	1	<1

Figura 29. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación de Emulsión Firme 70/30



Fuente: Autores

Figura 30. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Emulsión Firme 70/30

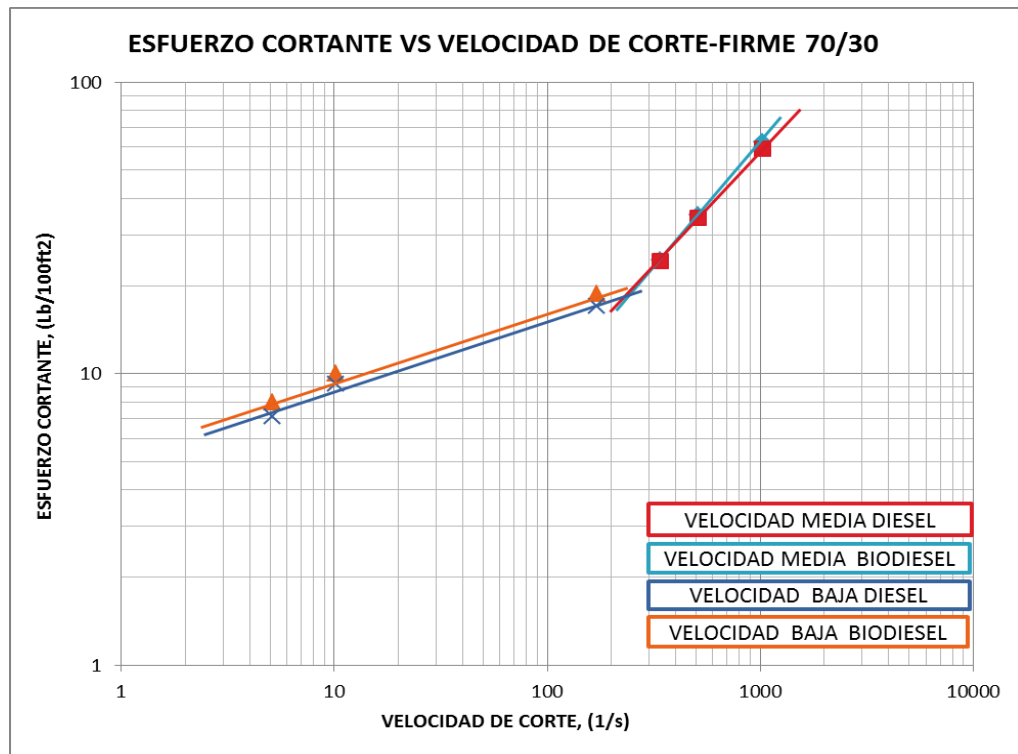
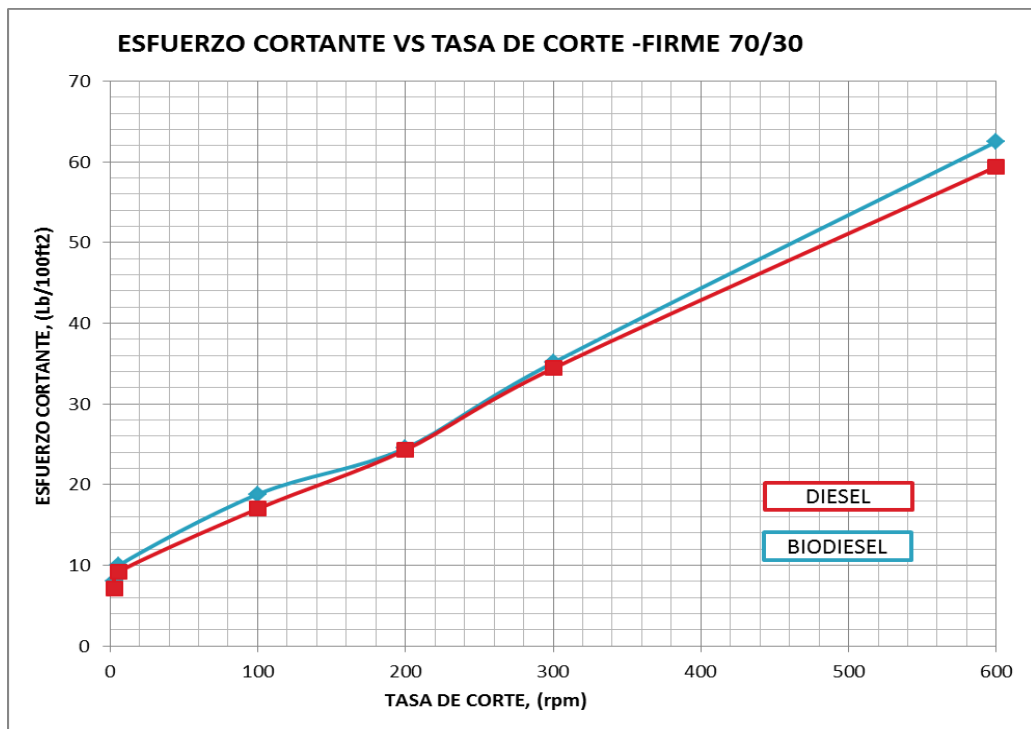


Figura 31. Esfuerzo de Corte vs Tasa de Corte Formulación Emulsión Firme 70/30



**Tabla 33. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Emulsión firme 70/30**

<b>Fase</b>	<b><math>n_p</math></b>	<b><math>n_a</math></b>	<b><math>k_p</math></b>	<b><math>k_a</math></b>
<b>Diesel</b>	0,79	0,25	0,27	5,06
<b>Biodiesel</b>	0,83	0,24	0,21	5,75
<b>Soya</b>				

De acuerdo con los resultados de las tablas 28 y 31, se analiza que la relación de esfuerzo de corte a velocidad de corte no es constante, sino diferente a cada velocidad de corte. Esto significa que los lodos base Diesel y Biodiesel de Soya son fluidos no newtonianos es decir la viscosidad cambia con las velocidades de corte.

Ahora bien de acuerdo a los datos de las tablas 29 y 32, tanto las formulaciones emulsión firme diesel, como las de emulsión firme biodiesel de soya, presentan la capacidad para desarrollar propiedades tixotrópicas con poca diferencia del valor de la fuerza de gel a 10 s y 10 min. Comparando los resultados para fase continua diesel firme 80/20 con fase continua biodiesel firme 80/20, a su vez de base diesel firme 70/30 y base biodiesel de soya firme 70/30; se detallan geles favorables que presentan valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos. Presentando particularmente las formulaciones con biodiesel de soya mejores propiedades de formar geles planos que faciliten la suspensión de ripios y del material densificante, reduciendo la posible decantación de sólidos en el fluido a condiciones estáticas.

Por otra parte los valores de viscosidad plástica para las formulaciones firme diesel y firme biodiesel de soya están dentro del rango de valores teóricos generalmente establecidos para la perforación de pozos ( $VP = 12 - 45$  cp); estos

valores incrementaron respecto a la formulación 100% aceite como consecuencia de las gotas de agua emulsionada presentes, las cuales actúan como sólidos. Ello causa el aumento de la viscosidad plástica cuando se aumenta la concentración de agua. Para las formulaciones diesel 80/20 firme, biodiesel de soya firme 70/30 se presentaron más altos valores de viscosidad plástica lo que representa una reducción en la humectabilidad de los materiales presentes en el lodo, que se traduce en un incremento en la fricción mecánica entre los sólidos presentes en el lodo.

El valor del punto cedente sufrió cambios favorables tanto para las formulaciones firme Diesel como Biodiesel de Soya, lo que es un indicativo claro de una mayor activación por efecto de la adición de agua de las cargas electroquímicas de la fase dispersa. Estas cargas provienen de las partículas de la arcilla organofílica, que bajo la acción del agua se acercan y ejercen la interacción de sus cargas bajo condiciones dinámicas. De esta manera los resultados para Biodiesel firme 80/20 y Diesel 70/30, poseen mayores fuerzas de atracción requeridas entre las partículas en condiciones dinámicas, evitando problemas de alta viscosidad y bajas tasas de penetración.

Los valores de filtrado recogidos de la prueba HPHT, variaron de 1 a 2,3 ml, los cuales se encuentran dentro de los parámetros permisibles en los lodos base aceite (< 6ml); siendo las formulaciones base diesel firme (80/20-70/30) las que poseen un mayor control de filtrado que su similar Biodiesel de Soya). La prueba indicó que no existe inestabilidad de la emulsión o pérdida anormal de filtrado, la pérdidas estuvieron muy por debajo del límite permisible y no se observó presencia de agua.

Los porcentajes del contenido de sólidos para las formulaciones son bajos, lo cual disminuye notablemente los daños que se pueden causar a la formación productora durante las operaciones de perforación.

Respecto a el valor de la Relación (O/W) para todas las formulaciones Emulsión Firme; base diesel y Biodiesel de Soya; se pudo verificar la eficiencia del balance de masa, lográndose conseguir de manera aproximada las fracciones volumétricas reales aceite – agua en las muestras tomadas, que es el resultado del proceso de mezclado de los aditivos y especialmente el aceite y el agua.

Entre los Cake no se encontró una gran diferencia en las formulaciones, todas mostraron un cake satisfactorio, y no se aprecia gran disparidad entre los resultados.

En las figuras 26 y 29 Viscosidad efectiva vs Velocidad de Corte formulación emulsión firme; 80/20 base Diesel y Biodiesel de Soya, 70/30 base Diesel y Biodiesel de Soya, se observa que el comportamiento pseudoplastico ideal en un lodo de perforación está muy bien definido en velocidades bajas y velocidades medias, con tendencias similares en ambas graficas.

Del mismo modo en dichas figuras se interpreta que las formulaciones a base Biodiesel de Soya 80/20 y 70/30 a altas velocidades de corte, disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte hasta alcanzar valores bajos de viscosidad en la columna de perforación y a través de la broca. Asimismo para velocidades de cortes medias y bajas son las formulaciones base Diesel 80/20 y 70/30 las que poseen una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo en el espacio anular.

Para la Figuras 27 y 30 Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte base Diesel y Biodiesel de Soya, firme (80/20-70/30) y las tablas 30 y 33 de resultados de n y k; se analiza que las mejores formulaciones a velocidades medias son las base diesel (80/20,70/30), puesto que el fluido limpia el pozo y suspende los materiales densificantes de manera eficiente, ello debido a que los valores de los índices de la ley de la potencia y de consistencia presentan menor índice de “n”, y valor alto de k. De igual modo las formulaciones base Biodiesel de Soya (80/20,70/30), a

velocidades bajas poseen un muy buen comportamiento, pues tiene un bajo valor de índice de la ley de la potencia (n) y un valor alto de consistencia (k), favoreciendo la capacidad de dicho lodo en la limpieza del pozo y suspensión de los recortes.

Referente a las figuras 28 y 31. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte firme (80/20-70/30) para las formulaciones base diesel y Biodiesel de Soya, se observa un comportamiento con tendencias no tan lineales como las formulaciones 100% aceite, que no pasan por el origen, dichas formulaciones se comparan con el modelo de Bingham el cual forma una línea recta. Puede decirse que en la zona de flujo en la tubería (lecturas tomadas  $\theta 600$  a  $\theta 200$ ) el modelo Bingham simula muy bien a los valores reales, sin embargo en la zona de flujo en el espacio anular los valores arrojados en este modelo son mucho más altos que los valores reales.

**Tabla 34. Reología de la Formulación Filtrado relajado 80/20**

<b>DIESEL No.2</b>				<b>Biodiesel de Soya</b>			
RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,3	40,7	20,4	600	1021,3	42,3	21,2
300	510,69	24,5	24,5	300	510,69	26,7	26,7
200	340,46	18,2	27,3	200	340,46	19,3	29
100	170,23	12,8	38,4	100	170,23	13,7	41,1
6	10,21	7,1	355	6	10,21	8,2	410
3	5,11	4,8	480	3	5,11	5,7	570

**Tabla 35. Propiedades de la Formulación Filtrado relajado 80/20**

<b>PROPIEDADES</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>DIESEL No.2</b>	<b>BIODIESEL</b>
Resistencia Gel 10''/10'		3,3/6,4	3/6
VP	cP	16,2	15,6
VA	cP	20,35	21,15

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	8,3	11,1
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	2,5	3,2
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2,6	3
Peso Lodo	lpg	9,2	9,2
% Agua	%(vol)	17	18
% Aceite	%(vol)	64,5	69
% Sólidos	%(vol)	18,5	13
Relación (O/W)	%(vol)	79/21	79/21
Cake		Consistente	Consistente
		Plástica	Plástica
	32avos	<2	<<1

Figura 32. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Filtrado relajado 80/20

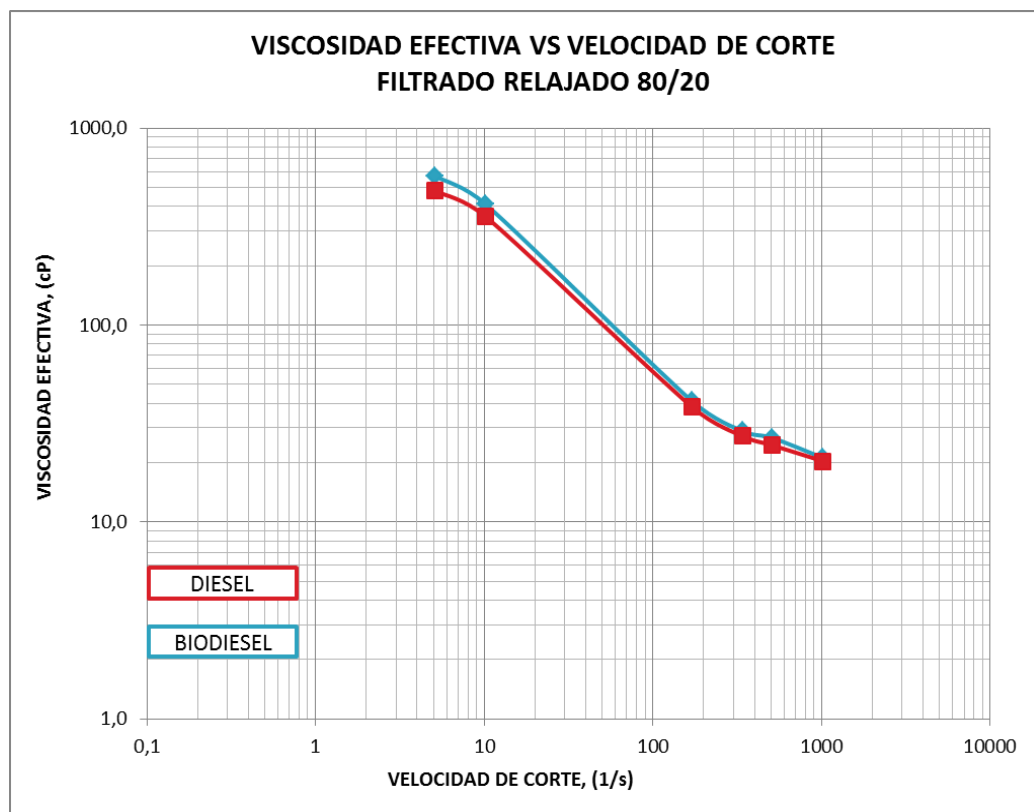


Figura 33. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Filtrado relajado 80/20

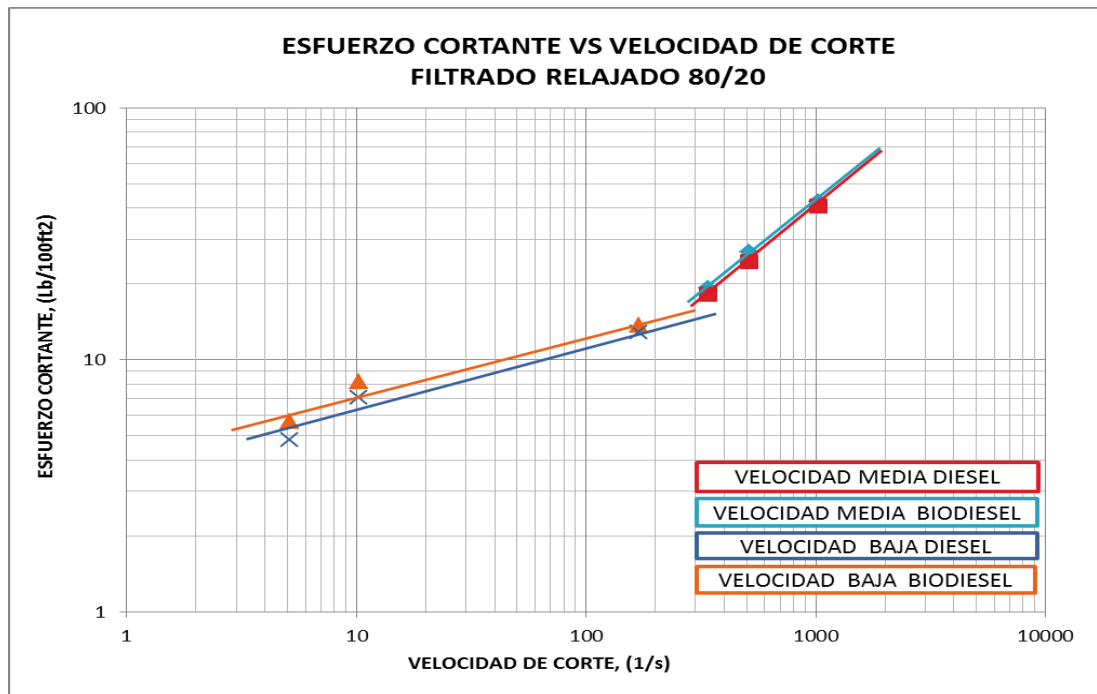
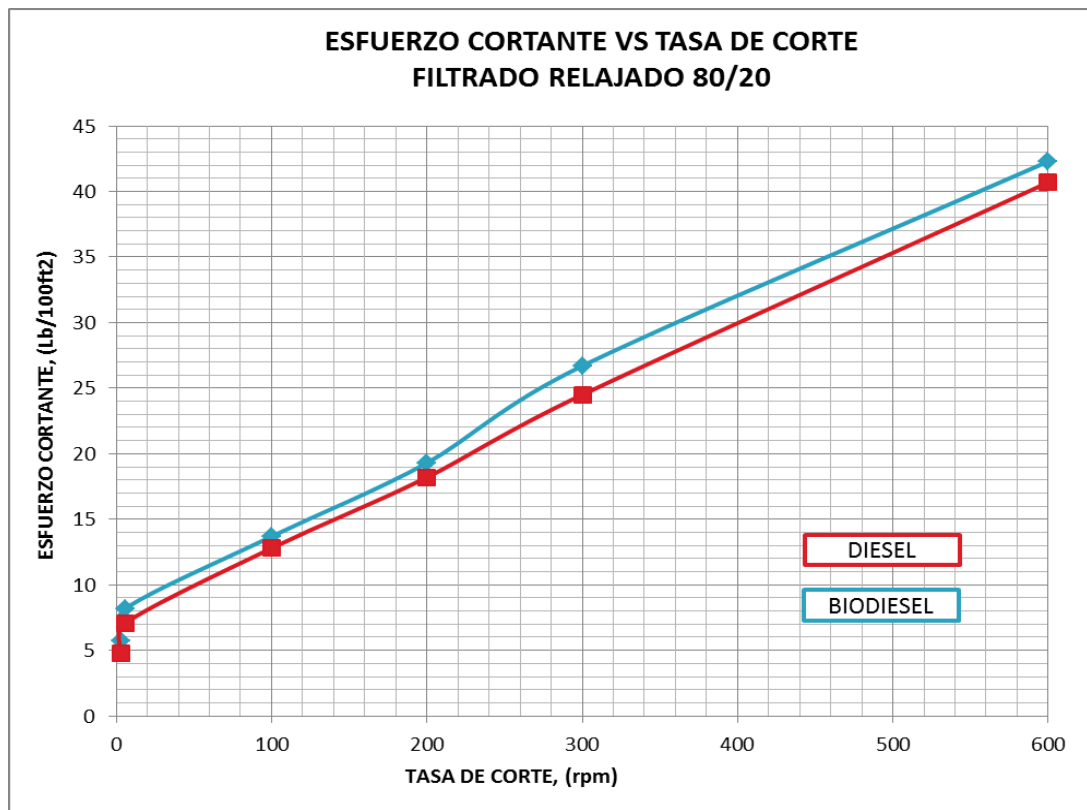


Figura 34. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Filtrado relajado 80/20



**Tabla 36. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Filtrado relajado 80/20**

Fase	$n_p$	$n_a$	$k_p$	$k_a$
<b>Diesel</b>	0,73	0,28	0,27	3,25
<b>Biodiesel</b>	0,66	0,25	0,46	4,06
<b>Soya</b>				

**Tabla 37. Reología de la Formulación de Filtrado relajado 70/30**

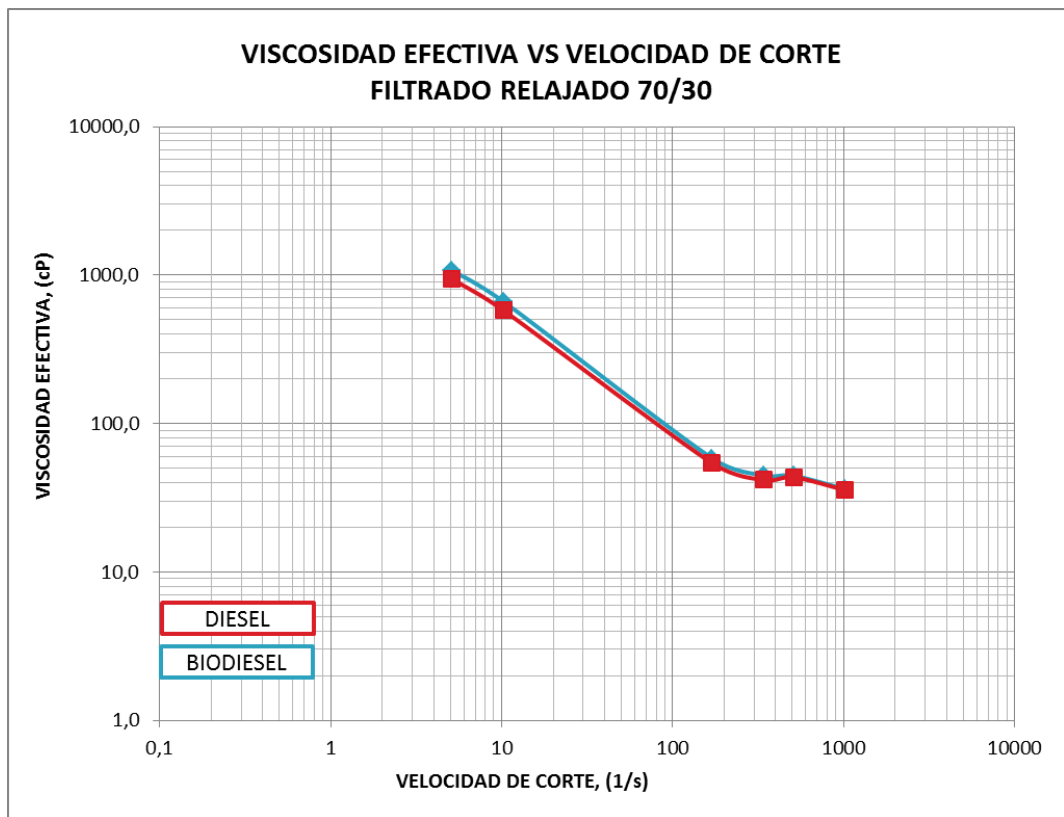
DIESEL No.2				Biodiesel de Soya			
RPM	$v$ (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	$v$ (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,3 8	71,2	35,6	600	1021,38	72,5	36,3
300	510,69	43,4	43,4	300	510,69	44,4	44,4
200	340,46	27,8	41,7	200	340,46	29,9	44,9
100	170,23	18	54	100	170,23	19,4	58,2
6	10,21	11,6	580	6	10,21	13,3	665
3	5,11	9,4	940	3	5,11	10,8	1080

**Tabla 38. Propiedades de la Formulación de Filtrado relajado 70/30**

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL SOYA
Resistencia Gel		5/10.6	4/8
VP	cP	27,8	28,1
VA	cP	35,6	36,25
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	15,6	16,3
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	7,2	8,3
HPHT 300 °F y	ml	2,8	3,2
Peso Lodo	lpg	9,25	9,1
% Agua	%(vol)	26,5	24
% Aceite	%(vol)	56,5	56
% Sólidos	%(vol)	17	20
Relación (O/W)	%(vol)	68/32	70/30

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL SOYA
Cake		Consistente	Consistente
		Plástica	Plástica
	32avos	2	Película De Torta

Figura 35. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Filtrado relajado 70/30



Fuente: Autores

Figura 36. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Filtrado relajado 70/30

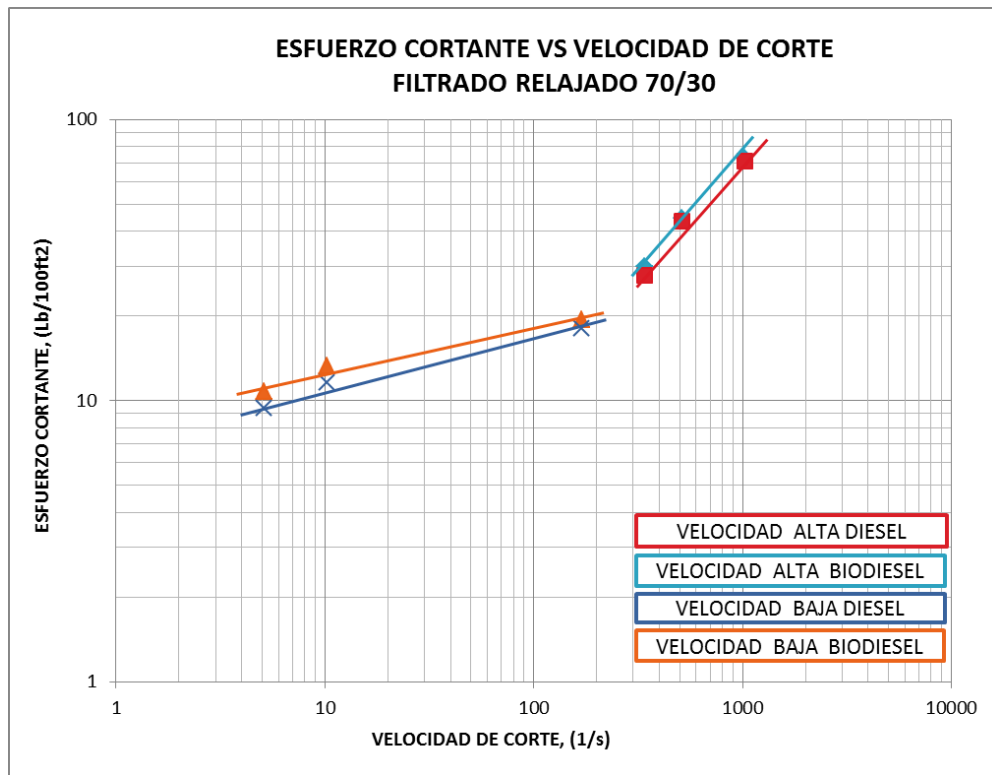
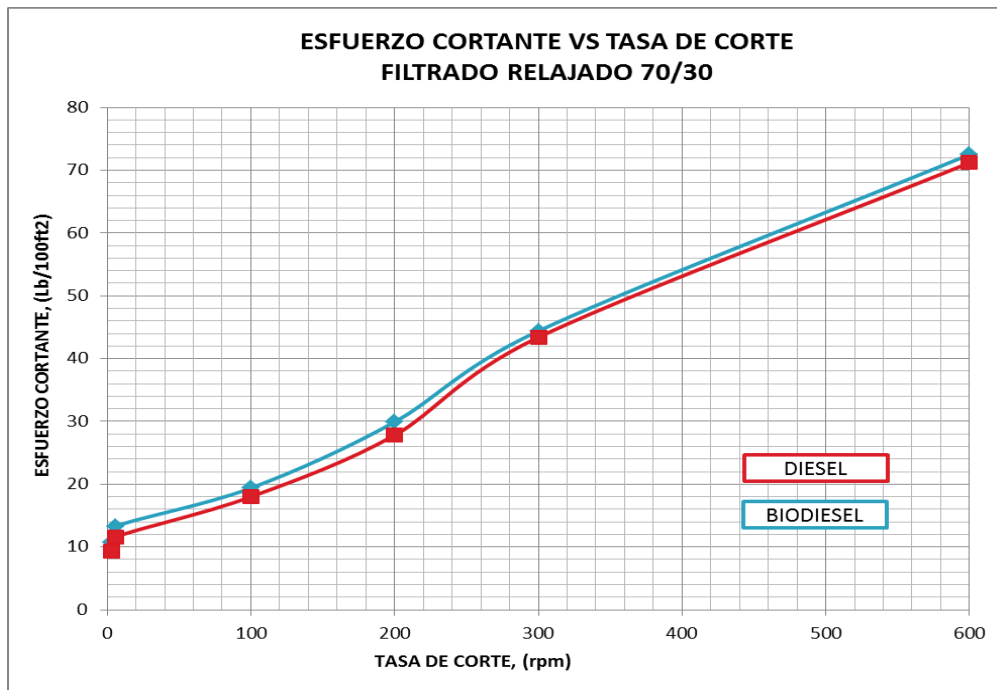


Figura 37. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Formulación Filtrado relajado 70/30



**Tabla 39. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Filtrado relajado 70/30**

<b>Fase</b>	<b><math>n_p</math></b>	<b><math>n_a</math></b>	<b><math>k_p</math></b>	<b><math>k_a</math></b>
<b>Diesel</b>	0,71	0,19	0,54	7,43
<b>Biodiesel Soya</b>	0,71	0,17	0,58	8,8

Por medio de las tablas 34 y 37, se puede percibir que las viscosidades efectivas disminuyen con el incremento de la velocidades de corte en tal sentido las formulaciones se tratan de fluidos pseudo plásticos

Como se puede ver en las tablas 35 y 38 las formulaciones base Diesel y Biodiesel De Soya exhibieron valores de fuerza de gel acordes para evitar la formación de geles progresivos en las muestras de lodos de emulsión inversa. Es importante que el fluido mantenga la capacidad de suspensión de los sólidos bajo condiciones estáticas, especialmente durante un viaje de tubería, evitando de esta forma la decantación de sólidos en el pozo.

Los valores de viscosidad plástica para ambas formulaciones Diesel y Biodiesel de soya filtrado relajado (80/20-70/30), están dentro del rango de valores teóricos generalmente establecidos para la perforación de pozos ( $VP = 12 - 45$  cp). Por otra parte la formulación de Biodiesel de Soya filtrado relajado (70/30) presento una reología inversa, es decir, el valor del punto cedente es mayor que la viscosidad plástica, esta es la característica principal en los lodos que presentan alta capacidad de limpieza, su uso es variado, pero es muy característico en pozos inclinados y horizontales, donde se requiere buen nivel de limpieza del hoyo y remoción de los ripios a la superficie.

Todas las formulaciones Diesel y Biodiesel de soya filtrado relajado (80/20-70/30), conservan la fuerza de atracción requerida entre las partículas en condiciones

dinámicas, manteniendo la viscosidad en valores adecuados y logrando buenas tasas de penetración

Los valores de las pérdidas de filtrado HPHT a lo largo de cada una de las formulaciones base aceite Diesel y Biodiesel de soya filtrado relajado (80/20-70/30) están acordes con los valores máximos permisibles en las pruebas de laboratorio y de campo (<6 ml). El lodo base Diesel indica menor cantidad de filtrado por tanto estos lodos ejercen mas control de filtrado que los base Biodiesel de soya, la prueba demostró que no existe inestabilidad de la emulsión o pérdida anormal de filtrado, las pérdidas estuvieron muy por debajo del límite permisible y no se observo presencia de agua.

El contenido de sólidos es mayor en los lodo base Diesel relajado 80/20 y base Biodiesel de Soya 70/30 pero estos resultados no afectan en gran medida los valores de viscosidad plástica.

Respecto a el valor de la Relación (O/W) para todas las formulaciones base diesel y Biodiesel de Soya filtrado relajado (80/20-70/30); se pudo verificar la eficiencia del balance de masa, lográndose conseguir de manera aproximada las fracciones volumétricas reales aceite – agua en las muestras tomadas, que es el resultado del proceso de mezclado de los aditivos y especialmente el aceite y el agua.

Entre los Cake poseen todas las formulaciones diesel y Biodiesel de Soya características consistentes, plástica con diferentes espesores en cada una de las bases.

En las figuras 32 y 35 Viscosidad efectiva vs Velocidad de Corte para cada una de las formulaciones filtrado relajado base Diesel y Biodiesel de Soya, se observa que el comportamiento pseudoplastico típico en un lodo de perforación está muy bien definido en velocidades bajas y velocidades medias.

Del mismo modo en dichas figuras se interpreta que las mejores formulaciones a altas velocidades de corte son base Biodiesel de Soya 80/20 y 70/30, estos lodos disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte hasta alcanzar valores bajos de viscosidad en la columna de perforación y a través de la broca. También para velocidades de cortes medias y bajas dichas formulaciones base Biodiesel poseen una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo en el espacio anular.

Para la Figuras 33 y 36 Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte base Diesel y Biodiesel de Soya filtrado relajado (80/20-70/30) y las tablas 36 y 39 de resultados de  $n$  y  $k$ ; se analiza que en las formulaciones base Biodiesel de Soya (80/20,70/30), respecto a las formulaciones base diesel; el fluido si se utilizara en pozo tendría buena capacidad de limpieza y suspendería los materiales densificantes de manera eficiente, ello debido a que los valores de los índices de la ley de la potencia y de consistencia a velocidades medias presentan menor índice de “ $n$ ”, y valor alto de  $k$ . De igual modo para formulaciones base biodiesel de Soya Filtrado relajado (80/20,70/30) respecto a su similar base diesel, poseen un mejor comportamiento pues tiene un bajo valor de índice de la ley de la potencia ( $n$ ) y un valor alto de consistencia ( $k$ ) a velocidades bajas, favoreciendo la capacidad de dicho lodo en la limpieza del pozo y suspensión de los recortes.

Referente a las figuras 34 y 37. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte filtrado Relajado, para las formulaciones base diesel y Biodiesel de Soya relajado 80/20 se observa un comportamiento con tendencias no tan lineales que no pasan por el origen, dichas formulaciones se comparan con el modelo modelo de Bingham el cual forma una línea recta. Se puede inferir que en la zona de flujo en la tubería (lecturas tomadas  $\theta 600$  a  $\theta 200$ ) el modelo Bingham simula muy bien a los valores reales, sin embargo en la zona de flujo en el espacio anular los valores arrojados en este modelo son mucho más altos que los valores reales. Para las formulaciones base diesel y Biodiesel de Soya relajado 70/30 se presentan curvas con tendencia potencial que no llega al origen, donde se evidencia cierta similitud

del comportamiento de dichas formulaciones, con la curva de ley exponencial modificada, al igual que la real, tampoco pasa por el origen y las lecturas en la zona que simula el espacio anular pueden estar cerca a los resultados experimentales.

**Tabla 40. Reología de Formulación Alto % Agua 50/50**

DIESEL No.2				Biodiesel de Soya			
RPM	$v$ (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	$v$ (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,38	96,6	48,3	600	1021,38	101,3	50,7
300	510,69	67	67,0	300	510,69	68,8	68,8
200	340,46	52,4	78,6	200	340,46	57,9	86,9
100	170,23	47,1	141,3	100	170,23	47,4	142,2
6	10,21	21	1050	6	10,21	13,1	655
3	5,11	16,2	1620	3	5,11	9,5	950

**Tabla 41. Propiedades de la Formulación de Alto % Agua 50/50**

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL SOYA
Resistencia Gel		2/4	2,6/5,2
VP	cP	29,6	32,5
VA	cP	48,3	50,65
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	37,4	36,3
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	11,4	5,9
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	3,4	5,8
Peso Lodo	lpg	9,4	9,5
% Agua	%(vol)	39,5	41
% Aceite	%(vol)	40,5	42
% Sólidos	%(vol)	20	17
Relación (O/W)	%(vol)	51/49	51/49
Cake		Inconsistente	Consistente
		Plástica	Plástica
	32avos	<1	<<1

Figura 38. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación de Alto % Agua 50/50

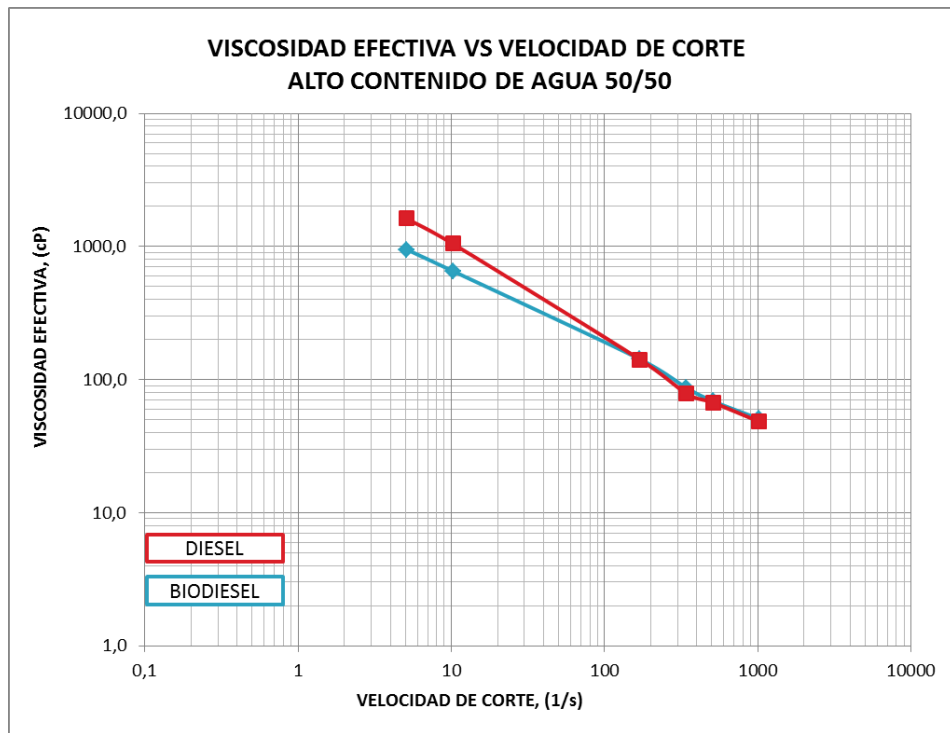


Figura 39. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación de Alto % Agua 50/50

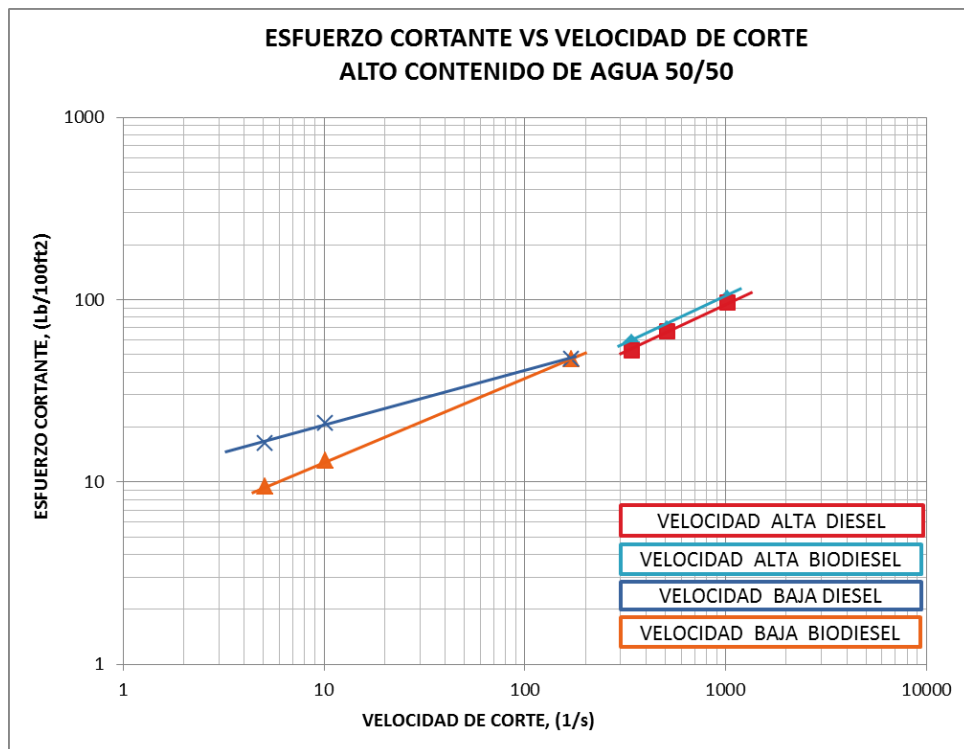


Figura 40. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Formulación de Alto % Agua 50/50

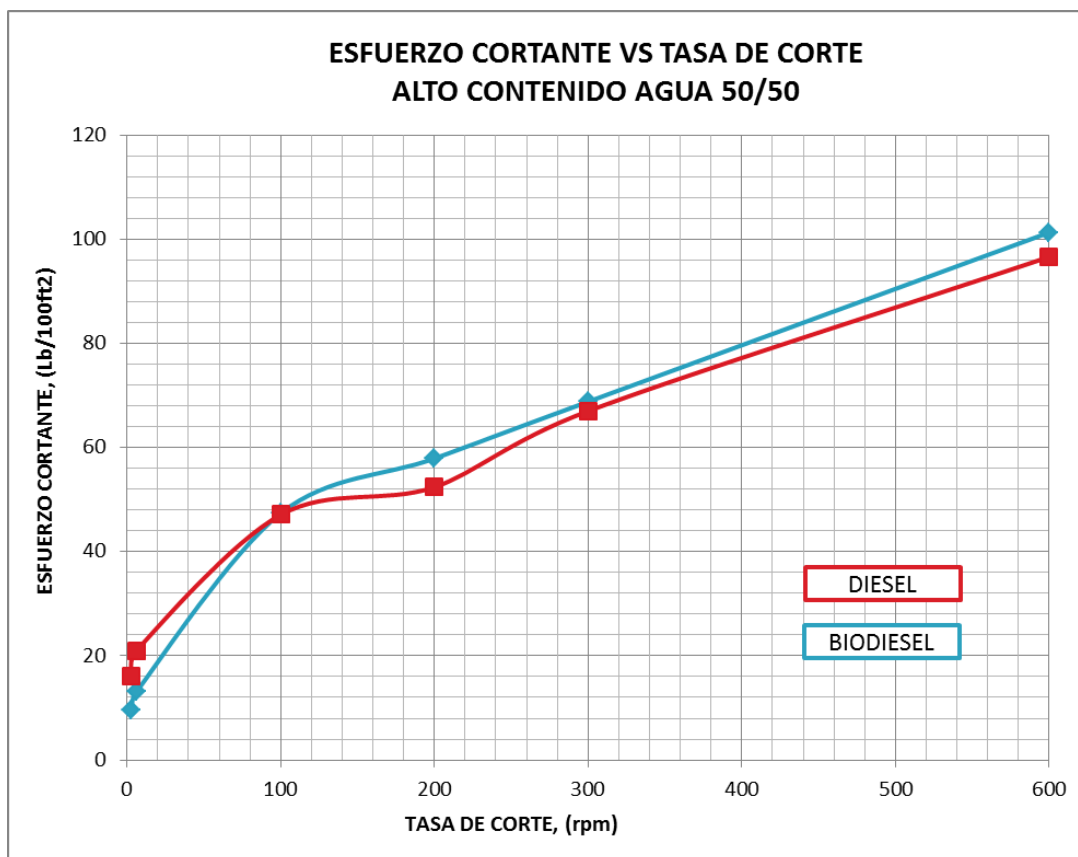


Tabla 42. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación de Alto % Agua 50/50

Fase	$n_p$	$n_a$	$k_p$	$k_a$
Diesel	0,53	0,3	2,67	10,55
Biodiesel Soya	0,56	0,46	2,27	4,81

Fuente: Autores

**Tabla 43. Reología de Formulación de Formulación Alto % Agua 40/60**

DIESEL No.2				Biodiesel de Soya			
RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	$\theta$ RPM lb/100ft <sup>2</sup>	$\mu$ Efec (Cp)
600	1021,38	169,3	84,7	600	1021,38	314,3	157,2
300	510,69	138	138	300	510,69	-	-
200	340,46	116	174	200	340,46	-	-
100	170,23	97,5	292,5	100	170,23	-	-
6	10,21	57,4	2870	6	10,21	-	-
3	5,11	53,9	5390	3	5,11	-	-

**Tabla 44. Propiedades de Formulación Alto % Agua 40/60**

PROPIEDADES	UNIDADES	DIESEL No.2	BIODIESEL
Resistencia Gel		9/16	30/32
VP	cP	31,3	-
VA	cP	84,65	157,15
YP	lb/100 ft <sup>2</sup>	106,7	-
YS	lb/100 ft <sup>2</sup>	50,4	-
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	3,6	15
Peso Lodo	lpg	9,5	>10
% Agua	%(vol)	49	45
% Aceite	%(vol)	33	31
% Sólidos	%(vol)	18	24
Relación (O/W)	%(vol)	40/60	41/59
Cake		Consistente	Inconsistente
		Plástica	Quebradiza
	32avos	Película De Torta	2

Fuente: Autores

Figura 41. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Alto % Agua 40/60

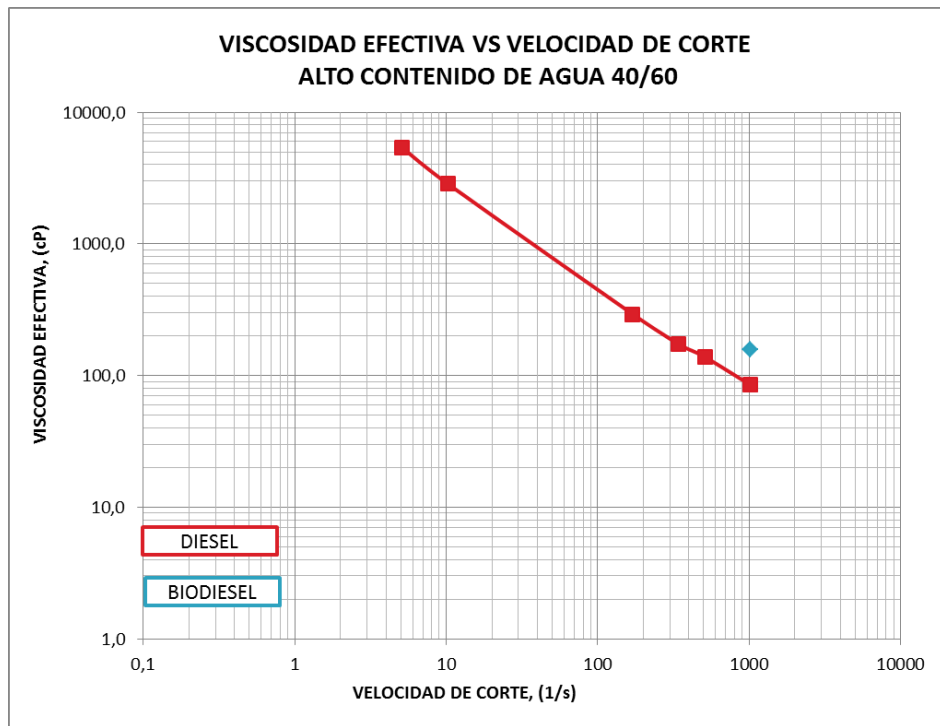
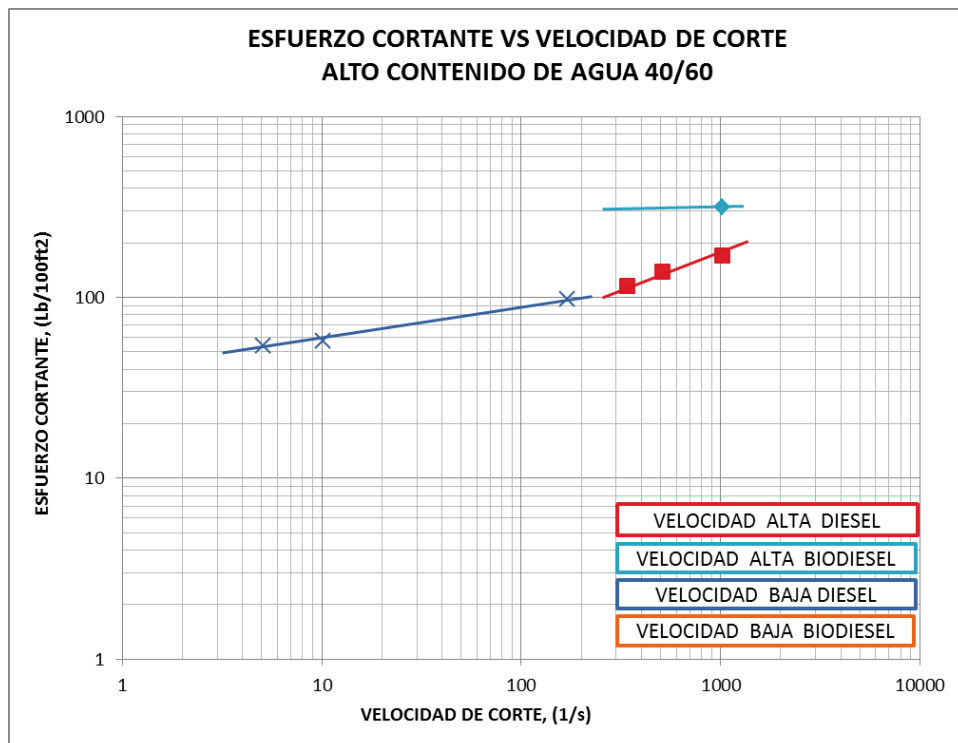


Figura 42. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Alto % Agua 40/60



Fuente: Autores

Figura 43. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte Formulación Alto % Agua 40/60

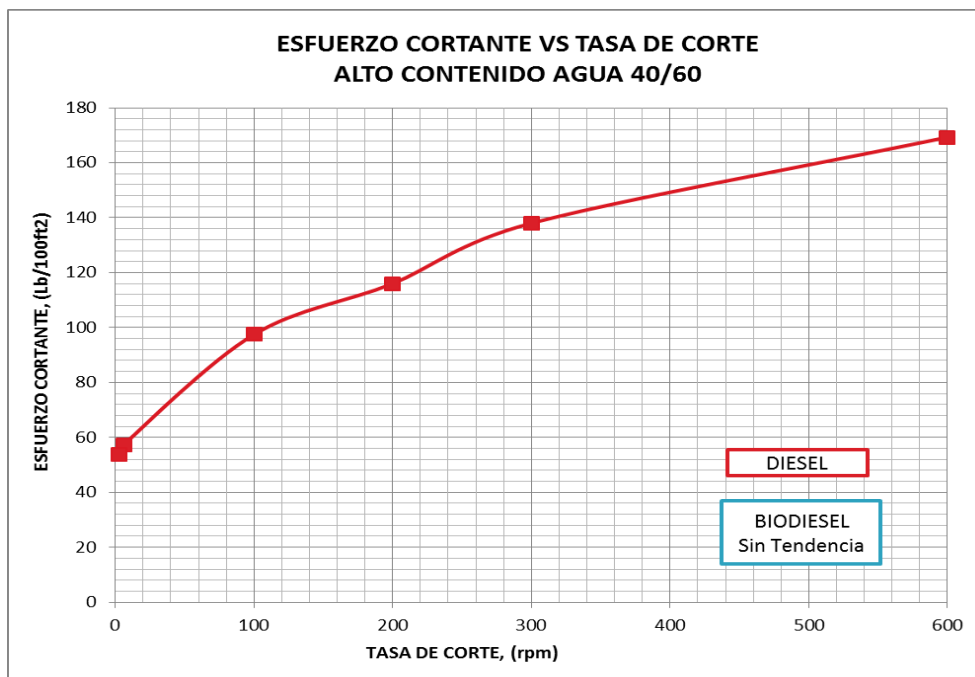


Tabla 45. Resultados de índice de la ley de la potencia, índice de consistencia para varios valores. Formulación Alto % Agua 40/60

Fase	$n_p$	$n_a$	$k_p$	$k_a$
Diesel	0,29	0,17	23,5	43,77
Biodiesel Soya	----	----	----	----

De acuerdo con los resultados de las tablas 40 y 43, se analiza que la relación de esfuerzo de corte a velocidad de corte no es constante, sino diferente a cada velocidad de corte. Esto significa que los lodos base Diesel con alto contenido de agua (50/50 y 40/60) y Biodiesel de Soya (50/50) son fluidos no newtonianos los cuales no poseen viscosidad única o constante que pueda describir su comportamiento de flujo a todas las velocidades de corte. La formulación Biodiesel de soya alto contenido de Agua (40/60), no presenta el comportamiento típico de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

En relación con los resultados de acuerdo con los datos de las tablas 41 y 44, Los valores de la resistencia de gel se encuentran dentro del rango de geles favorables para las formulaciones Diesel con alto contenido de agua (50/50 y 40/60) y Biodiesel de Soya (50/50), puesto que se presentan valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos. No obstante los esfuerzos de gel para la formulación de Biodiesel de Soya (40/60) son geles invariables o instantáneos tienen altos valores casi idénticos a los 10 segundos y a los 10 minutos, esta excesiva gelación es el resultado de una alta concentración de sólidos, lo que lleva a la floculación del lodo causando un aumento de viscosidad, gelificación y filtrado.

Por otra parte los valores de viscosidad plástica para las formulaciones alto contenido de agua diesel (50/50-40/60) y Biodiesel de Soya (50/50) están dentro del rango de valores teóricos generalmente establecidos para la perforación de pozos ( $VP = 12 - 45$  cP); estos valores incrementaron como consecuencia de las gotas de agua emulsionada presentes las cuales actúan como sólidos. Esto causa el aumento de la viscosidad plástica cuando se aumenta la concentración de agua. Reflejándose esto, en un aumento de la presión de funcionamiento de las bombas para mantener el caudal requerido de lodo, lo cual produce una alta contrapresión capaz de ocasionar pérdidas de circulación.

Para la formulación de Biodiesel de Soya (40/60) La reología está fuera de rango para valores de velocidad bajas, y a velocidades medias y altas estos valores son muy elevados.

El valor del punto cedente para todas las formulaciones se vio incrementado lo que indica que fueron activadas las cargas electroquímicas presentes en los aditivos del lodo. El punto cedente fue atribuido a la acción de las cargas en las partículas de arcilla organofílica, que debido a la acción del agua perdieron parte

de su humectabilidad de las partículas en aceite, confinándose, lo que les permitió una asociación de cargas electroquímicas a condiciones dinámicas.

Los valores de filtrado de la prueba HPHT, variaron de 3,4 a 3,6 ml, para las formulaciones alto contenido de agua diesel; los cuales se encuentran dentro de los parámetros permisibles en los lodos base aceite (< 6ml); De igual forma para las formulaciones Biodiesel Soya alto contenido de agua, variaron desde 5,8 para la formulación 50/50 cumpliendo apenas con el rango establecido y 15 ml para la formulación 40/60 la cual tiene un gran problema en controlar filtración de alta presión.

El contenido de sólidos es mayor en las formulaciones diesel alto contenido de agua 50/50 y biodiesel Soya 40/60, en relación a la formulación Diesel 50/50; aunque ello no sugiere un aumento considerable de la viscosidad plástica por amontonamiento de sólidos. Para la relación 40/60 Biodiesel soya un aumento en la viscosidad plástica, trae como consecuencia elevados valores en su densidad y en general en todas las propiedades del lodo.

Respecto al valor de la Relación (O/W) para todas las formulaciones pudo verificar la eficiencia del balance de masa, lográndose conseguir de manera aproximada las fracciones volumétricas reales aceite – agua en las muestras tomadas, que es el resultado del proceso de mezclado de los aditivos y especialmente el aceite y el agua.

El cake para la formulación alto contenido de agua Biodiesel de soya resulto inconsistente, quebradizo de 2/32 pulgada. Para las demás formulaciones no encontramos una gran diferencia ninguna mostró un cake satisfactorio, y no se aprecia gran diferencia entre los resultados.

En las figuras 38 y 41 Viscosidad efectiva vs Velocidad de Corte 50/50 base Diesel y Biodiesel de Soya, 40/60 base Diesel, 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 gráficas. No obstante la formulación Biodiesel de soya alto contenido de Agua (40/60), describe de manera errónea la relación entre Viscosidad efectiva y Velocidad de corte.

Del mismo modo en dichas figuras se muestra que las formulaciones a base Biodiesel de Soya 50/50 y 40/60 son las de mejor comportamiento a altas velocidades de corte, puesto que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte hasta alcanzar valores bajos de viscosidad en la columna de perforación y a través de la broca. Asimismo para velocidades de cortes medias y bajas las formulaciones base Diesel 50/50 y 40/60 las que poseen una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo en el espacio anular.

Para las Figuras 39 y 42 Esfuerzo de Corte vs Velocidad de Corte base Diesel y Biodiesel de Soya, alto contenido de agua y las tablas 42 y 45 de resultados de  $n$  y  $k$ ; se analiza que a velocidades medias las mejores formulaciones son las base diesel (50/50,40/60), puesto que el fluido limpia el pozo y suspende los materiales densificantes de manera eficiente, ello debido a que los índices de la ley de la potencia y de consistencia a dichas velocidades presentan menor índice de “ $n$ ”, y valor alto de  $k$ . De igual modo a velocidades bajas las formulaciones base diesel de (50/50,40/60), poseen un muy buen comportamiento pues tienen un bajo valor de índice de la ley de la potencia ( $n$ ) y un valor alto de consistencia ( $k$ ), favoreciendo la capacidad de dicho lodo en la limpieza del pozo y suspensión de los recortes.

Referente a las figuras 40 y 43. Esfuerzo de Corte vs. Tasa de Corte para las formulaciones base diesel (50/50-40/60) y Biodiesel de Soya (50/50) alto

contenido de agua, se presentan curvas con tendencia potencial que no llega al origen, donde se evidencia cierta similitud del comportamiento de dichas formulaciones, con la curva de ley exponencial modificada, al igual que la real, tampoco toca el origen y las lecturas en la zona que simula el espacio anular pueden estar cerca a los resultados experimentales.

### **4.3 ANALISIS DE RESULTADOS**

De acuerdo a la figura 44 exceptuando la formulación Biodiesel De soya alto contenido de agua 40/60, se observó en las demás formulaciones un adecuado control del filtrado HPHT comprobando de esta forma la capacidad de la Gilsonita para regular la velocidad de filtrado ante temperaturas cercanas a 300 °F; Los valores de pérdida de filtrado reportaron valores dentro de los rangos permisibles en lodos de perforación base aceite (< 6 ml). Siendo los lodos base diesel quienes ejercen mayor control de filtrado

Cabe destacar que al recibir el filtrado no se evidenció la separación de las fases, ni el decantamiento de sólidos, factor de vital importancia en la estabilidad de la emulsión.

La resistencia al gel para la formulación Biodiesel de Soya alto contenido de agua 40/60, se tiene que tanto la lectura inicial como la lectura a los 10 minutos sus valores son cercanos y elevados (ver figura 45), este tipo de gel es conocido como gel instantáneo, lo que indica que existe una floculación del lodo. Esta imposibilidad de dicha formulación de formar geles adecuados puede ser explicada debido a que las interacciones atractivas de la fase dispersa son inexistentes, con lo cual no se desarrollan las estructuras rígidas reversibles (baja capacidad tixotrópica).

Como se puede ver en la figura 45, las demás formulaciones poseen valores de fuerza de gel favorables tienen valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos, dichos tipos de geles facilitan la suspensión de ripios y del material densificante, reduciendo la posible decantación de sólidos en el fluido a condiciones estáticas.

La resistencia de gel es ligeramente mayor en lodos con base Biodiesel de soya, exceptuando las formulaciones filtrado relajado (80/20-70/30) donde la formulación base Diesel es relativamente mayor. En las formulaciones base Biodiesel de soya se evidencia que entre mayor contenido de agua presente la resistencia de gel toma una diferencia considerable y mayor con respecto a los lodos base diesel, lo que nos indica que a mayor contenido de agua en un lodo base Biodiesel de soya, este mantendrá los ripios en estado de suspensión por mayor tiempo que el lodo base Diesel.

En relación al contenido de sólidos como lo indica la figura 46, es mayor para lodos base Diesel en las formulaciones (100% Aceite, Filtrado Relajado 80/20 y alto contenido de agua 50/50), de igual manera es mayor en lodos base Biodiesel de soya en las Formulaciones (firme 80/20-70/30, Filtrado Relajado 70/30 y alto contenido de agua 40/60). Al respecto conviene decir que la formulación de mayor contenido de sólidos es alto contenido de agua 40/60 Biodiesel soya; viendo claramente afectada su estabilidad, como consecuencia del alto contenido de sólidos, los cuales se introducen en el sistema haciendo la emulsión más débil. Los sólidos adsorben y se humedecen de aceite de tal modo que hay menos aceite disponible para mantener separadas las gotas de agua y evitar así que coalezcan. Estos sólidos incorporados tienden a crear una emulsión de aceite en agua en vez de una emulsión de agua en aceite.

Respecto al valor de la Relación (O/W) para todas las formulaciones pudo verificar la eficiencia del balance de masa, lográndose conseguir de manera aproximada

las fracciones volumétricas reales aceite – agua en las muestras tomadas, que es el resultado del proceso de mezclado de los aditivos y especialmente el aceite y el agua.

El valor del punto cedente sufrió cambios favorables con el aumento de la cantidad de agua presente en la fase discontinua del lodo tanto para las formulaciones Diesel como Biodiesel de Soya, lo que es un indicativo claro de una mayor activación por efecto de la adición de agua a las cargas electroquímicas de la fase dispersa. Estas cargas provienen de las partículas de la arcilla organofílica, que bajo la acción del agua se acercan y ejercen la interacción de sus cargas bajo condiciones dinámicas. De esta manera poseen mayores fuerzas de atracción requeridas entre las partículas en condiciones dinámicas, evitando problemas de alta viscosidad y bajas tasas de penetración.

En las graficas de viscosidad especifica vs. Velocidad de corte se observa que el Biodiesel de soya en comparación con su similar base diesel, en la medida que aumenta la relación de agua presenta mejores comportamientos para altas velocidades de corte; ello debido a que dicho lodo disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte hasta alcanzar valores bajos de viscosidad, si se aplicará en pozo lo anterior ocurriría en la columna de perforación y a través de la Broca, reduciendo la presión de circulación y las pérdidas de presión.

Análogamente y con excepción de las formulaciones de filtro relajado base Biodiesel de soya, es el lodo base diesel quien presenta mejores comportamientos respecto a su similar base Biodiesel Soya en velocidades de corte medias a bajas, como consecuencia de que dicho lodo tiene una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo.

En las graficas de Esfuerzo Cortante vs. Velocidad de corte al interpretar los índices de consistencia y de flujo a velocidades medias, observamos que salvo la formulaciones de filtro relajado base Biodiesel de Soya; son las formulaciones base Diesel respecto a su similar Biodiesel soya quienes presentan menor índice

de “n”, y valor alto de k. Por lo cual dicho lodo limpia el pozo y suspende los materiales densificantes de manera más eficiente.

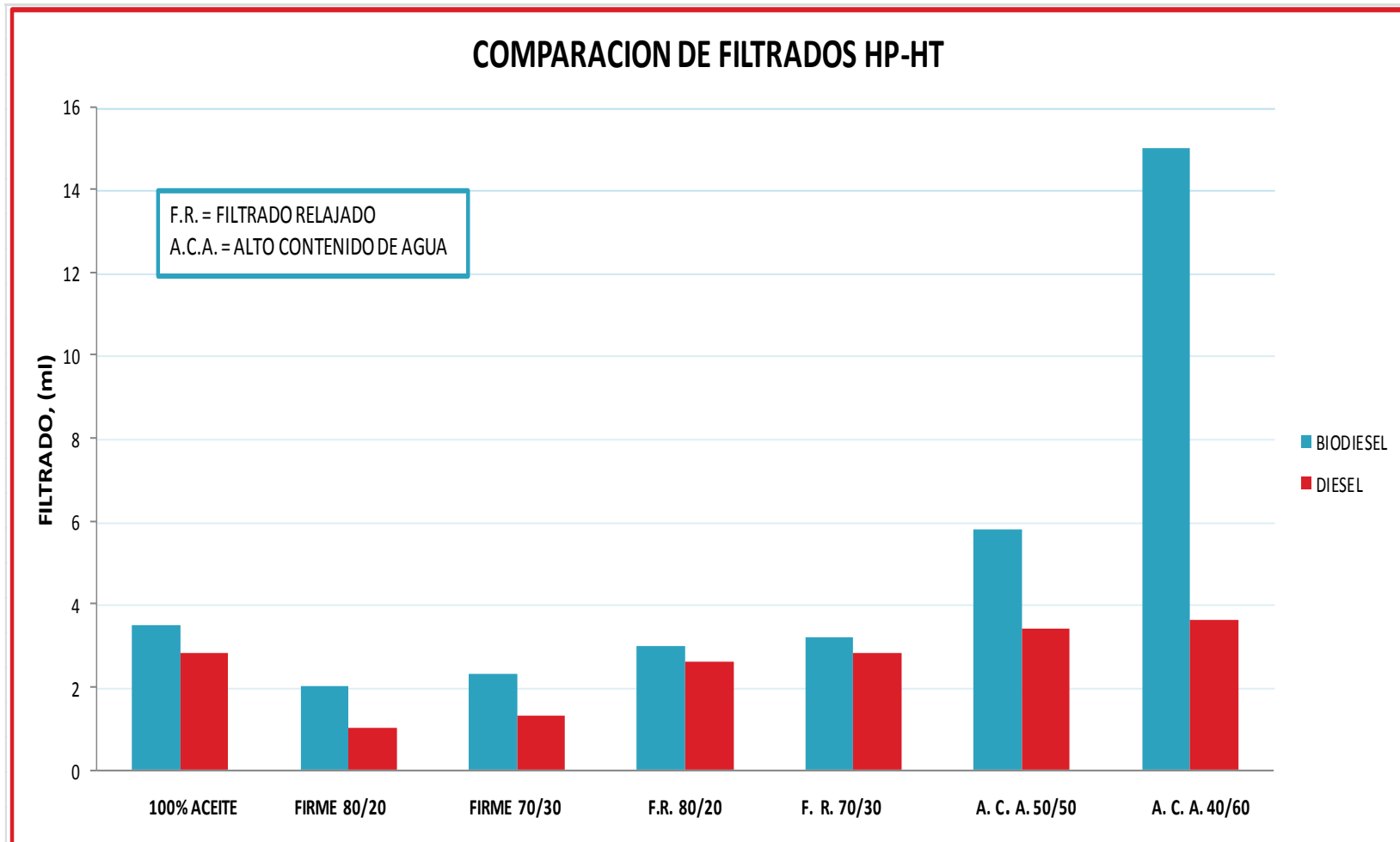
Paralelamente a velocidades bajas salvo las formulaciones Diesel alto contenido de agua; son las formulaciones base Biodiesel de Soya respecto su similar Diesel quienes presentan menor índice de “n”, y valor alto de k. Limpiando el pozo y suspendiendo los materiales densificantes de manera eficiente.

Respectó a las pruebas químicas; los resultados de alcalinidad estuvieron aceptables en un rango de 2,5-3,8 ml. La alcalinidad de las formulaciones debería ser mantenida por encima de 2,5 ml; si la alcalinidad de una de las formulaciones cae a menos de 2,5 ml por mucho tiempo, la emulsión puede volverse inestable. En general, una alta alcalinidad produce una emulsión de agua en aceite más estable.

El exceso de Cal determinado en las pruebas químicas estuvo en un rango de 3,24-4,92 lb/bbl, contribuyendo notablemente en el concentración de iones ( $\text{OH}^-$ ) presentes en el lodo base aceite, el cual es fundamental para combatir la contaminación con  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$  del sistema, sin alterar significativamente la alcalinidad y la reología del lodo. El exceso de Cal debe mantenerse durante la perforación en un valor superior a 4 lb/bbl, conservando de esta forma la capacidad del lodo para secuestrar  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$ .

Los valores de salinidad determinados están el rango de los 214.257-254.275ppm, conservado la concentración de sales de Cloruro de Calcio en la fase acuosa del fluido, proporcionando las fuerzas osmóticas indispensables para deshidratar las formaciones de lutitas problemáticas.

Figura 44. Comparación de filtrados HPHT



Fuente: Autores

Figura 45. Análisis de Geles

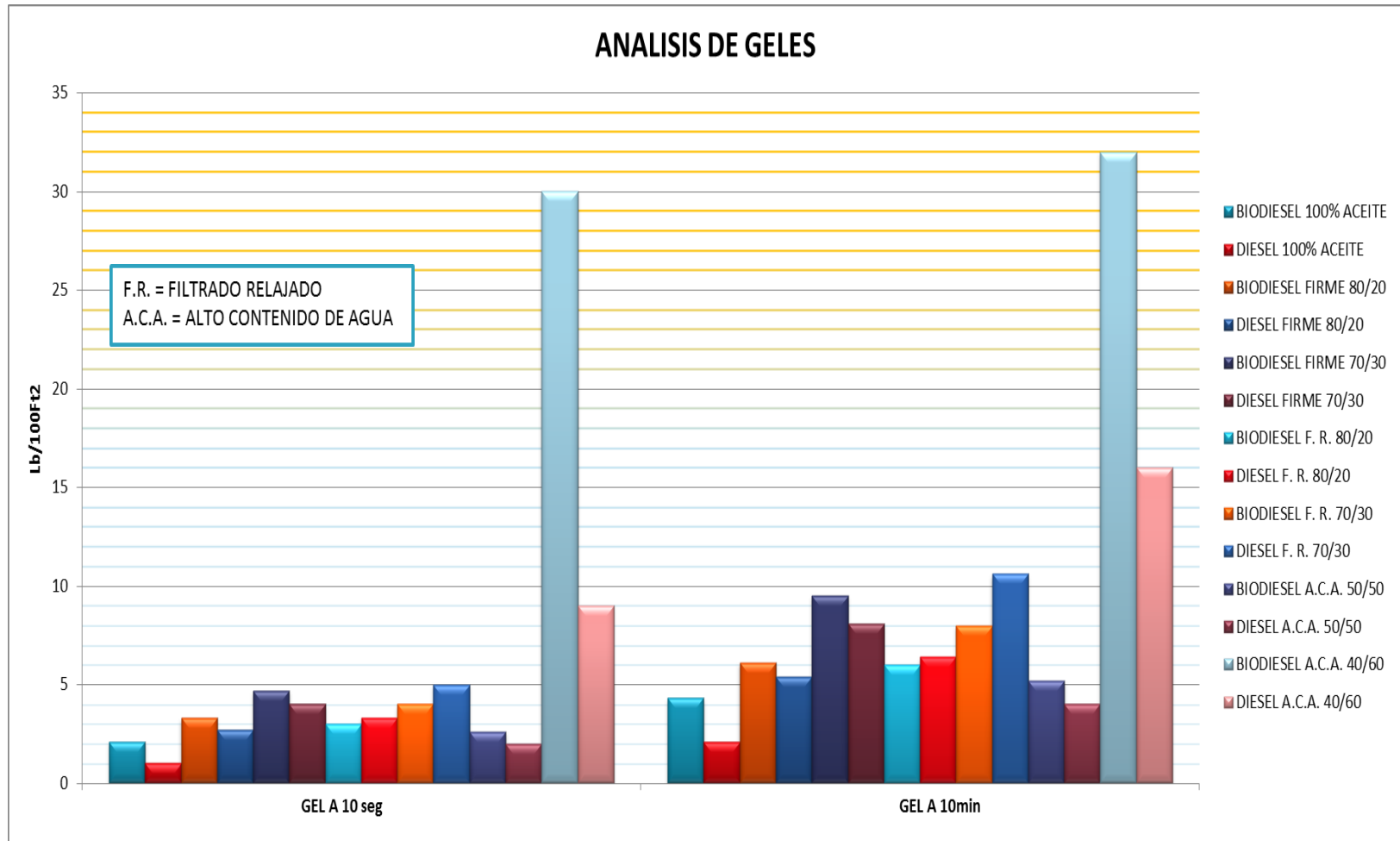
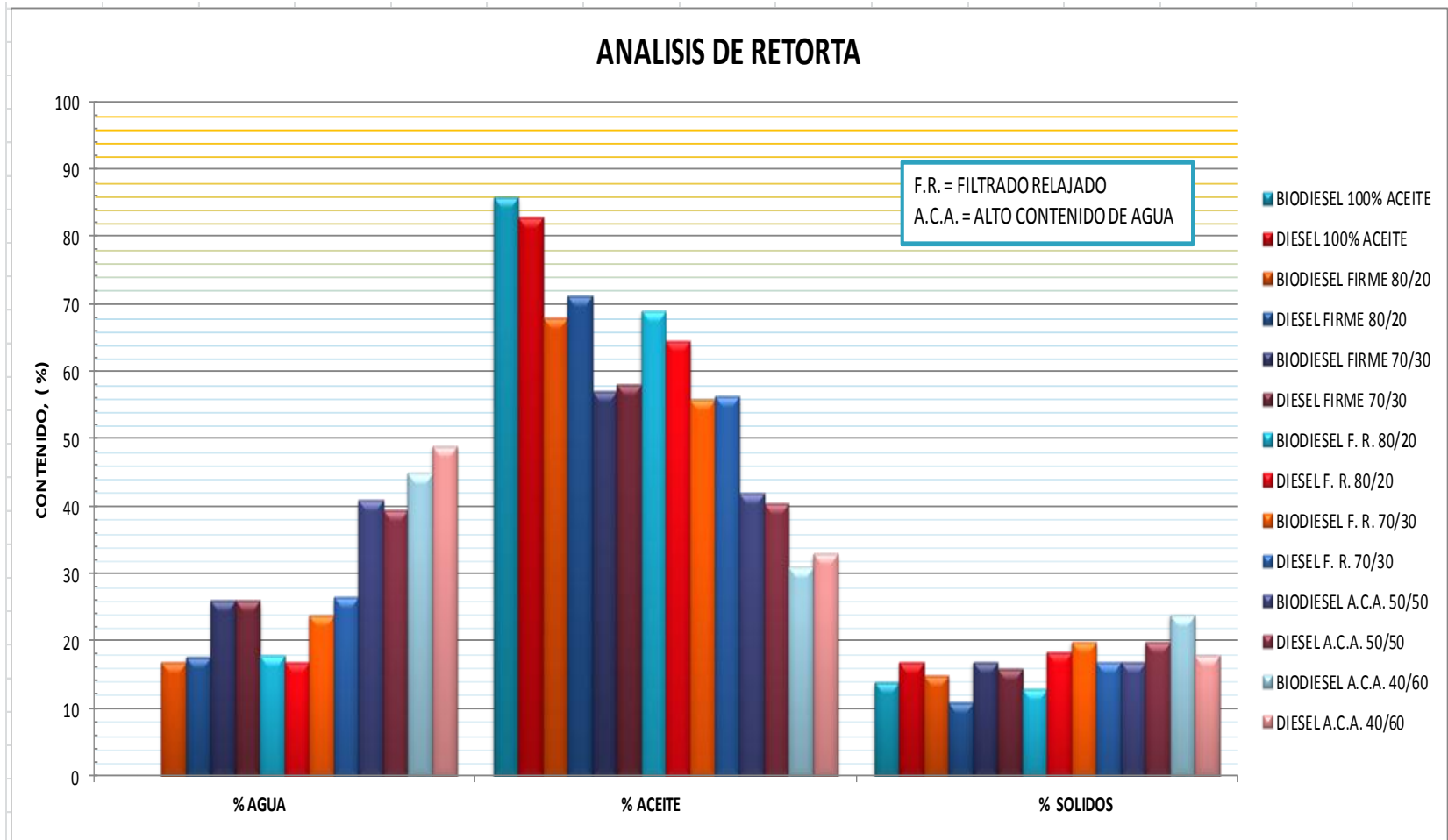


Figura 46. Análisis de Retorta



Fuente: Autores

## 5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL BIODIESEL DE SOYA COMO FASE CONTINUA EN LODOS PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA

El sistema base aceite emulsión inversa como fase continua Diesel es más económico que los sistemas base Biodiesel De Soya, porque la fase continúa del mismo tiene un menor costo.

El costo por barril del fluido base aceite como fase continua Diesel es de 160 US\$/bbl. Asimismo el costo por barril del sistema cuya fase continúa es Biodiesel de Soya fue 285 US\$/bbl. Representando una diferencia de 125 US\$/bbl entre ambos fluidos. En las tablas 46 y 47 están especificados los costos por barril de las dos formulaciones fase continua Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente.

**Tabla 46. Costo Por Barril Emulsión Inversa 70/30 O/W. Fase continua Diesel No. 2 <sup>12</sup>**

1 bbl del fluido de base	Relación: 70/30 O/W					
	Densidad: 9 lpg					
Aditivo	Concentración	Unidad (Según pedido mínimo)	Cantidad Mínima Compra	Cantidad Real	US\$ Valor Unitario	Costo por Barril (US\$/bbl)
Diesel No.2	0,62 bbl	Galón	1 Gal	26	4,38	113,88
Agua	0,27 bbl	-	-	-	-	-
CaCl <sub>2</sub>	23,36 lb/bbl	80,02 lb /scs	1 scs	0,292	26,69	7,79
Q' Mul 1	0,96 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,017	557,04	9,47
Q' Mul 2	0,19 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,003	612,62	1,84
Gilsonita HT	8 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,160	70,57	11,29
Q' Mul Gel	3 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,060	69,06	4,14
Cal	4 lb/bbl	55 lb/scs	1 scs	0,073	15,08	1,10
Barita	51,46 lb/bbl	100 lb/scs	1 scs	0,515	20,1	10,35
					<b>Costo por Barril (US\$/bbl)</b>	<b>160</b>

<sup>12</sup> Costo basado en los Precios de los aditivos según laboratorios QMax Solutions Colombia-2012.

Tabla 47. Costo Por Barril Emulsión Inversa 70/30 O/W. Fase continua Biodiesel de Soya <sup>13</sup>

1 bbl del fluido de base	Relación: 70/30 O/W					
	Densidad: 9 lpg					
Aditivo	Concentración	Unidad (Según pedido mínimo)	Cantidad	Cantidad Real	US\$ Valor Unitario	Costo por Barril (US\$/bbl)
Biodiesel De Soya	0,63 bbl	Galón	1 Gal	27	8,9	240,3
Agua	0,27 bbl	-	-	-	-	-
CaCl <sub>2</sub>	23,49 lb/bbl	80,02 lb /scs	1 scs	0,294	26,69	7,85
Q' Mul 1	0,96 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,017	557,04	9,47
Q' Mul 2	0,19 gal/bbl	55 gal/tamb	1 tamb	0,003	612,62	1,84
Gilsonita HT	8 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,160	70,57	11,29
Q' Mul Gel	3 lb/bbl	50 lb/scs	1 scs	0,060	69,06	4,14
Cal	4 lb/bbl	55 lb/scs	1 scs	0,073	15,08	1,10
Barita	44,32 lb/bbl	100 lb/scs	1 scs	0,443	20,1	8,90
				<b>Costo por Barril (US\$/bbl)</b>		<b>285</b>

Fuente: Autores

• **Costos de Producción del Biodiesel De Soya <sup>(20)</sup>**

Para determinar el costo de producción del biodiesel, se tomó como modelo el trabajo realizado en 1996 por el Instituto de Economía y Sociología Rural del INTA junto con ASA (American Soybean Association), convenio para estudios de factibilidad técnica y económica para su desarrollo. A su vez el Estudio para determinar la factibilidad técnica y económica del desarrollo del biodiesel. Jorge Ugolini en Abril de 2008.

El modelo de la planta es para una industria que tiene una capacidad de molienda de 500 toneladas por día de soya y que dedica la totalidad del aceite producido a

<sup>13</sup> Costo basado en los Precios de los aditivos según laboratorios QMax Solutions Colombia-2012. Costo total del Biodiesel de Soya (importado) según Advanced Organic Materials S.A. AOM-Argentina.

la fabricación de biodiesel. Esto significa una molienda anual de 182.500 toneladas para una producción de aceite de 33.000 toneladas.

El costo de inversión inicial para montar la planta, se calcula en US\$ 541.126 para lo que se infiere un préstamo bancario con amortización anual a 10 años y un interés del 15 % sobre saldo.

Los impuestos se calculan en base a tributos provinciales como el inmobiliario (1 % sobre valor) e ingresos brutos (1 % sobre ventas), y los nacionales como activos o renta presunta (1 % sobre valor activos) e impuesto de avalúo (35 %). No se computa el cálculo del IVA por que se considera que es de efecto neutro, a pesar de algún costo financiero que provenga de la posible demora en la recuperación de los créditos fiscales.

En el cálculo de los costos operativos se computan las necesidades de insumos para la producción del biodiesel. De alcohol metílico son necesarios 3.564.000 litros y 49.500 kg de catalizador.

El costo de la energía eléctrica y para la generación de 16.500 toneladas de vapor, más grandes volúmenes de agua refrigerante son tomados en cuenta, igualmente que el personal en relación de dependencia con su correspondiente costo laboral, emanado de las leyes vigentes en materia previsional y de seguridad social.

Para el mantenimiento de la planta se calcula el 2.3 % sobre el capital invertido, y para seguros el 1.5 %. El costo financiero sobre el capital de trabajo se calcula con una tasa del 18 % anual.

Finalmente se toma el aceite de soya al precio de mercado que es actualmente de 1170 U\$S/tn, porque no necesariamente la planta de producción de biodiesel

requiere invertir en otra de molienda de soya, sino que es complementaria de aquella.

Las ventas de subproductos de una planta como la descrita en este modelo, consisten en 4.000.000 litros de glicerina, 429.000 kg de ácidos grasos y 47.000.000 litros de biodiesel.

El costo neto adjudicado al ester de soya, luego de descontar los ingresos provenientes por las ventas de los otros subproductos, es de US\$ 0,80/lit y se calcula un margen de ganancia por la venta del biodiesel del 20 %, por lo que el precio de venta a la salida de planta sería de US\$ 0,96/lit.

Con estos supuestos el monto de las ventas anuales sería de US\$ 48.274.800 y los costos de US\$ 40.626.719, por lo que los ingresos serían de US\$ 7.648.081 al año.

En la tabla 48 se calcula los ingresos anuales para el caso de que se venda el biodiesel a la salida de planta a US\$ 0,96/lit.

**Tabla 48. Costos de Producción del Biodiesel De Soya**

<b>Costo de producción del biodiesel</b>	
	<b>US\$</b>
<b>Costo Montaje Planta Industrial</b>	<b>541.126</b>
Amortización 10 años	54.113
Interés sobre capital 15%	81.169
Impuestos: inmobiliario, IB, ganancias, activos	682.964
Costo Operativo	39.483.798
Administración y Ventas	324.675
<b>Costo Total</b>	<b>40.626.719</b>
<b>IMPUESTOS</b>	
Impuesto Inmobiliario 1%	5.411
Impuesto a los Activos 1%	5.411
Ingresos Brutos (1 % s/ ventas)	482.748
Impuesto a las Ganancias 2,2% (ventas-costos)	189.394
<b>Total Impuestos</b>	<b>682.964</b>
<b>COSTO OPERATIVO</b>	
Alcohol metílico 3.564.000 lts.a 0,07 US\$/lt.	249.480
Catalizador 49.500 Kg a 0,11 US\$/lt.	5.445
Costo Laboral 5 obreros a 3000 US\$/mes	180.000
Aportes prev. y seg. social 33% s/sueldos	59.400
Energía 297.000 kw/h a 0,01 US\$/kw/h	2.970
Vapor 16,500 tns a 2,17 US\$/tn.	35.805
Agua refrigerante	11.255
Mantenimiento 2,3 % s/capital	12.446
Seguros 1,5 % s/capital	8.117
Compra Aceite Soya 33.264 tns. a 1170 US\$/tn.	38.918.880
<b>Total Costo Operativo</b>	<b>39.483.798</b>

<b>VENTAS DE SUBPRODUCTOS</b>	
Glicerina 4.000.000 lts. a 0,66 US\$/lt.	2.640.000
Acidos Grasos 429.000 kg. a 1,2 US\$/kg.	514.800
Biodiesel 47.000.000 lts. a 0,96 US\$/lt.	45.120.000
<b>Total de Ventas</b>	<b>48.274.800</b>
<b>COSTO NETO PRODUCCIÓN DEL ESTER</b>	
Venta glicerina y ácidos grasos	3.154.800
Costo Total de producción	40.626.719
Costo a imputar para el ester	37.471.919
Costo por litro	<b>US\$ 0,80</b>
Venta salida de planta con 20 % de margen. Costo por litro	<b>US\$ 0,96</b>
<b>INGRESO ANUAL</b>	<b>7.648.081</b>

Fuente: UGOLINI. Jorge. Estudio para determinar la factibilidad técnica y económica del desarrollo del biodiesel. Abril 2008. Modificado por los autores.

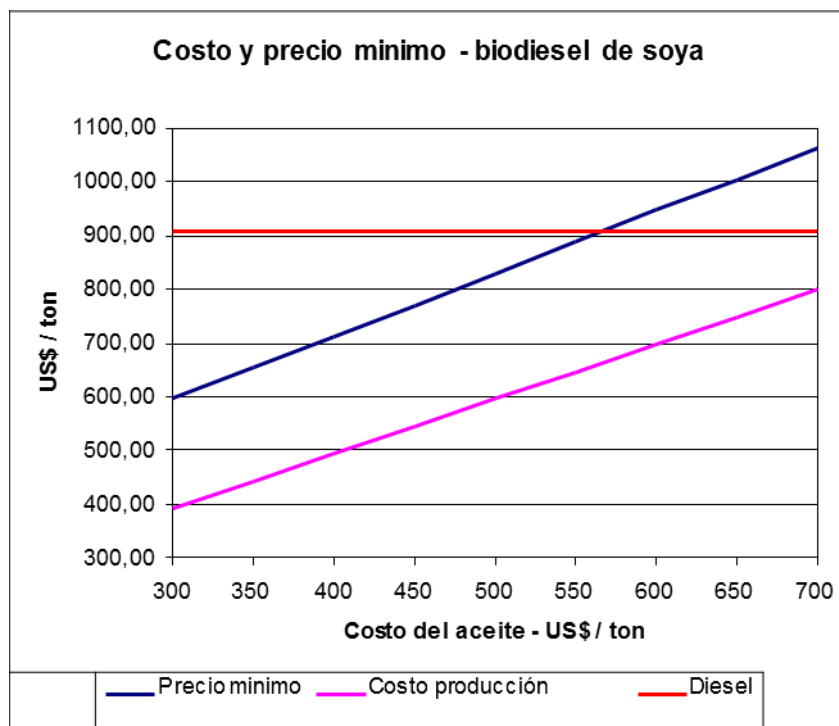
Para mostrar cómo los precios de las materias primas influyen sobre los costos de producción y, por lo tanto, los precios mínimos de venta, se presentan simulaciones del estudio elaborado por Waldyr Luiz Ribeiro Gallo, en el marco del Proyecto "Inception Workshop for the Implementation of the Strategic Partnership", Convenio CEPAL-Agosto 2007. Para el caso de la soya, mostrados en las Figuras 47 y 48.

Las hipótesis empleadas para la determinación de los costos y precios mínimos son: costos de extracción de aceite y del proceso de transesterificación (sin materias primas) constantes, valor de mercado de harina de soya a US\$ 10 sobre el costo agrícola y valor de mercado de glicerina constante a US\$ 650. La diferencia entre el costo de producción y el llamado precio mínimo toma en cuenta el margen de la industria, fijo en 15% sobre el costo de producción y los márgenes

de comercialización, fijos en dólares y equivalentes a los márgenes usuales en el mercado de distribución y comercialización al detalle del diesel de petróleo. No se consideran tributos, es decir, las exenciones son totales. <sup>(17)</sup>

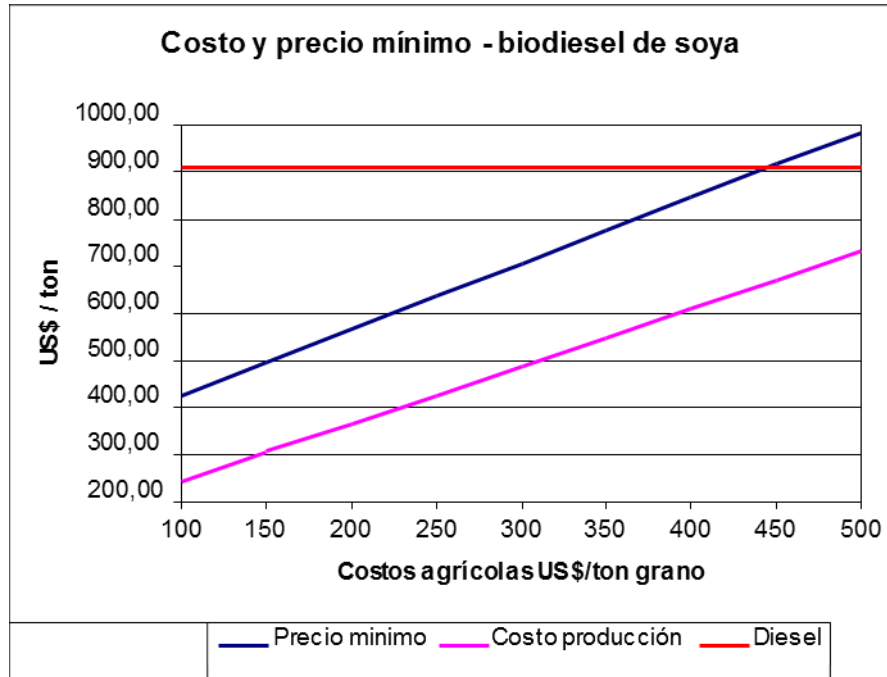
En la figura 47 se indican los costos de producción de una planta de biodiesel aislada que compra su materia prima (aceite vegetal de Soya) en el mercado. El precio al consumidor del diesel es el límite para el precio mínimo para que el nuevo producto no sea más costoso para el consumidor. En el caso de la figura 47, el precio límite para la adquisición del aceite de soya es alrededor de US\$ 550 por tonelada. Cabe señalar que los impuestos y tasas colocan la línea de precio mínimo aún más elevada y entonces el valor límite para el aceite de soya es más bajo.

**Figura 47. Influencia Del Costo Del Aceite Sobre la Viabilidad Del Biodiesel**



Fuente. Perspectivas Para El Biodiesel Convenio Cepal- Waldyr Ribeiro-2007

**Figura 48. Influencia Del Costo Del Aceite Sobre la Viabilidad Del Biodiesel**



Fuente. Perspectivas Para El Biodiesel Convenio Cepal- Waldyr Ribeiro-2007

Para verificar qué ocurre con los costos de producción y los precios mínimos para el biodiesel de Soya cuando la planta productora es completamente integrada, es decir, cuando la materia prima es afectada por los costos agrícolas se simuló la variación de costos agrícolas para obtención de la soya en grano en el rango de US\$ 100 hasta US\$ 500 dólares. Como se ve en el gráfico 48, el costo máximo para la producción agrícola de soya está alrededor de los US\$ 450. Si hay impuestos o tasas, el costo agrícola en que el precio mínimo del biodiesel encuentra el precio de mercado del diesel será menor.

Los gráficos anteriores figuras 47 y 48 son solamente ilustrativos. En realidad, unas cuantas variaciones de costos o precios de venta pueden hacer que la planta produzca un resultado económico neto positivo o negativo. <sup>(17)</sup>

**Tabla 49. Costos Generados Por El Lodo Base Aceite - Fase continua Diesel**

<b>LODO BASE ACEITE - FASE CONTINUA DIESEL</b>				
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>COSTO UNIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>Preparación Lodo Nuevo</b>	US \$160	Nº Barriles (sección)	1200	US \$ 192.000
<b>Tratamiento de Cortes, Almacenamiento y Transporte (Catch tank y volqueta)</b>	US \$ 1900	(día)	15	US \$ 28.500
<b>Tratamiento de Aguas, Productos Químicos, Tanques de Almacenamiento, Desorción térmica</b>	US \$1.500	(día)	15	US \$ 22.500
	US \$100	Nº Barriles (sección)	280	US \$ 28.000
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>US \$ 271.000</b>

Fuente. Ramírez. Francisco. Mejora de la productividad con el uso de aditivos nacionales en fluidos de perforación. PDVSA. 2005. Modificado por los Autores.

**Tabla 50. Costos Generados Por El Lodo Base Aceite - Fase continua Biodiesel de Soya**

<b>LODO BASE ACEITE - FASE CONTINUA BIODIESEL DE SOYA</b>				
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>COSTO UNIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>Preparación Lodo Nuevo</b>	US \$170	No Barriles (sección)	1.200	US \$ 204.000

<b>LODO BASE ACEITE - FASE CONTINUA BIODIESEL DE SOYA</b>				
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>COSTO UNIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>Tratamiento de Cortes, Almacenamiento y Transporte (Catch tank y volqueta)</b>	US \$1.000	(día)	15	US \$ 15.000
<b>Tratamiento de Aguas, Productos Químicos, Tanques de Almacenamiento,</b>	US \$1.000	(día)	15	US \$ 15.000
<b>Desorción térmica</b>	US \$ 70	No Barriles (sección)	280	US \$ 19.600
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>US \$ 253.600</b>

Fuente. Ramírez. Francisco. Mejora de la productividad con el uso de aditivos nacionales en fluidos de perforación. PDVSA. 2005. Modificado por los Autores.

**Tabla 51. Costos comparativos para el sistema fase continua Aceite Diesel / Biodiesel de Soya**

<b>COMPARATIVOS DE COSTOS TOTALES</b>	
	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>LODO BASE DIESEL</b>	US \$ 271.000
<b>LODO BASE BIODIESEL DE SOYA</b>	(-) US \$ 253.600
<b>DIFERENCIACIÓN DE COSTOS</b>	US \$ 17.400

El resultado final de costos económicos, entre los dos sistemas ver tablas (49 y 50) nos muestra que el fluido con fase continúa base Biodiesel de Soya cuyo precio fue asumido como si este se comparará a partir de producción Nacional, nos genera un ahorro de (US\$17.400) como se puede observar en la tabla 51, en comparación de usar Diesel como fase continúa. Adicionalmente al usar lodos base Biodiesel de Soya se obtiene un beneficio en el impacto ambiental, debido a

que no se utilizan sustancias que contaminan las áreas en donde se realizan las operaciones de perforación, minimizando los costos de recuperación ambiental los cuales son de suma importancia en la generación de calidad de vida de los habitantes que habitan las zonas en donde se realizan los distintos procedimientos.

Según el estudio: “Mejora de la productividad con el uso de aditivos nacionales en fluidos de perforación” <sup>(17)</sup>. Fue llevado a cabo en Venezuela en el área Lago Central, por parte de PDVSA en el año 2005. Los resultados de campo obtenidos usando como fase continua aceite de palma esterificado de fabricación nacional, como componente del fluido de perforación base aceite durante la perforación de los pozos SVS-410 y CLA-399 hasta una profundidad de 14175’, muestran una reducción en el costo del Lodo de 6% frente al uso del diesel como fase continua.

Este Trabajo permitió realizar la comparación de costos entre estos dos sistemas, para llegar a la conclusión que los sistemas que usan aceites vegetales esterificados reducen los costos de operación y lo más importante la mitigación del impacto ambiental de las zonas y los cortes generados en los procesos de perforación. <sup>(17)</sup>

En cuanto al manejo de los desechos para cumplir con las disposiciones ambientales. Los ripios obtenidos de la perforación con el fluido base aceite fase continúa aceite de palma esterificado, fueron tratados por desorción térmica al evaluar el tiempo que toma estos ripios en alcanzar las especificaciones establecidas por la normativa ambiental, en comparación con el tratamiento realizado a los ripios obtenidos de la perforación con el fluido base diesel; los resultados obtenidos demostraron que los ripios impregnados con el fluido base aceite de palma esterificado alcanzaron los valores especificados en un tiempo mucho menor que el requerido por los ripios humectados con el fluido base diesel. Los ripios, con el fluido aceite de palma alcanzaron en solo 60 días los

parámetros especificados en las regulaciones ambientales, mientras que los ríos con el fluido base diesel requieren de 180 días para alcanzar estos parámetros.

## 6. CONCLUSIONES

- Técnicamente, es factible el uso del Biodiesel de soya, como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. El lodo propuesto para este fin bajo distintas formulaciones (salvo 40/60 Alto contenido de agua) cumple las perspectivas esperadas. El sistema exhibió viscosidades plásticas bajas y estabilidad en la reología, sus tortas delgadas pueden llegar en campo a reducir la posibilidad de una pega de tubería, o de suaveo (swabbing). Las pérdidas de filtrado del Biodiesel de soya se encuentran dentro de los parámetros permisibles en los lodos base aceite ( $< 6\text{ml}$ ), ello ratifica la eficiencia de este sistema para regular los volúmenes de filtrados ante condiciones de alta presión y alta temperatura. Estas características lo postulan como un reemplazo creíble de la fase continua en lodos de emulsión inversa.
- En la formulación de Biodiesel soya alto contenido de agua 40/60, los análisis de viscosidad de dicha formulación resultan ser excesivamente viscosos. Los filtrados obtenidos en las pruebas de “HPHT” son muy altos, independientemente de la concentración y tipo de controlador de filtrado empleado.
- El Biodiesel de Soya es compatible con la mayoría de los aditivos para lodos base aceite, pues ninguno presenta precipitaciones o reacciones que demuestren lo contrario.
- De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis estadístico de las propiedades evaluadas, se puede concluir que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones Biodiesel de soya y

Diesel como fase continua en lodos de emulsión inversa, exceptuando la de alto contenido de agua 40/60.

- Los valores de la resistencia de gel se encuentran dentro del rango de geles favorables para ambas formulaciones Diesel y Biodiesel de soya; puesto que se presentan valores bajos a los 10 segundos y luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos. los esfuerzos de gel para la formulación de Biodiesel de Soya sugieren mayor capacidad para suspender el material densificante y los recortes.
- Desde el punto de vista económico no es factible el uso de Biodiesel de Soya (importado) como fase continua en lodos base aceite. La proporción del incremento del costo por barril entre el fluido base aceite cuya fase continua es Diesel y el base Biodiesel de Soya es de un 44%, ello teniendo en cuenta que en Colombia no existe producción de biodiesel a partir de la soya, por tanto dicho biodiesel debe ser importado desde Argentina generando sobrecostos en la fase continua del fluido.

Sin embargo, de llegarse a obtener Biodiesel de Soya a partir de producción Nacional, el costo total de la operación disminuye gracias a que los recortes de perforación impregnados con aceites vegetales esterificados, pueden ser tratados mediante las técnicas de tratamiento en períodos de tiempo cortos y con bajo costo asociado. Haciendo su utilización económicamente factible considerando una reducción de costos del 6,4 % respecto a los fluidos base Diesel.

- Según los estudios de toxicidad y biodegradabilidad que se han realizado a esteres vegetales usados como fase continua en lodos base aceite, indican que los ripios producidos son ambientalmente seguros durante la práctica de perforación por ser no tóxicos y biodegradables.

- Las formulaciones de fluido base éster vegetal como fase continua en lodos base aceite, son una excelente alternativa para perforar pozos en áreas de extrema sensibilidad ambiental, facilitan los procesos de manejo, tratamiento y disposición de ripios permitiendo recuperar las zonas afectadas con la siembra de vegetación autóctona, ello debido a su condición vegetal.
- Los resultados experimentales del valor de la densidad en los lodos preparados mostraron una mínima variación en su valor original planteado en el balance de masa, lo que puede atribuirse a errores de pesaje causado por la incertidumbre del equipo, errores de paralaje y el escurrimiento de líquidos en los envases utilizados.

## 7. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de reología a alta temperatura y presión (FANN 70,75) para estudiar el comportamiento de los aditivos en los diferentes sistemas a estas condiciones.
- Evaluar las propiedades del fluido ante agentes considerados contaminantes para un sistema de emulsión inversa, tales como: Sulfuro de Hidrógeno, Dióxido de Carbono, aguas y sólidos de la formación.
- Realizar pruebas de estabilidad eléctrica, pruebas de envejecimiento, 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 de Soya.
- Utilizar los mismos sistemas que aquí se presentan pero a otras densidades observando el comportamiento de sus propiedades con el aumento del material densificante.
- Efectuar un seguimiento al comportamiento de la estabilidad, en los sistemas 40/60 Base Biodiesel de soya, debido a que presentan valores reológicos no medibles.
- Complementar los estudios, con la utilización de toda la amplia gama de aditivos base aceite actualmente disponibles, con el fin de una correcta comparación de los resultados de las propiedades de dichos lodos.

- Utilizar carbonato de calcio como material densificante en sustitución de barita, con la finalidad de aprovechar sus cualidades de material puenteante.

## BIBLIOGRAFIA

1. 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.
2. ACOSTA G. Sergio y RUEDA V Germán. Estudio de la factibilidad del uso del aceite de palma como fase continúa en lodos de perforación de emulsión inversa. UIS. Bucaramanga 2002.
3. Answer to Environmental Legislations Around Offshore Drilling". Paper SPE 26737-MS
4. BENAVIDES A. Fabio, QUINTERO G. Jimmy. Estudio de factibilidad del uso del biodiesel como fase continúa en lodos de perforación de emulsión inversa. UIS. Bucaramanga 2010.
5. BERNA A. Tatiana, ILIAS MELGAREJO Ibis. Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continúa en fluidos de perforación de emulsión inversa. UIS. Bucaramanga 2008.
6. CAMARGO Wilson, RAMOS Felipe, CARRASQUERO Jairo, AROCHA Juan. IV Seminario de fluidos de perforación y completación "Aplicación de Campo de aceite de baja toxicidad en pozos de alto riesgo.
7. DEGOUY, DIDIER, ARGILLIER, J-F., Inst. Francais du Petrole; DEMOULIN, ANDRE, VELGHE, FIRMIN, "Research: Biodegradable Muds: An Attractive

- 8.** DOSUNMU. Adewale. Development of environmentally friendly oil based mud using palm- oil and groundnut-oil. Paper SPE 140720.
- 9.** GARCÍA ALVAREZ. David. Estudio del efecto de la adición del compuesto z – trol 60 como emulsificante y humectante en fluidos de perforación base aceite. UCV. Venezuela 2002
- 10.** GUARACHI Laura. Guía de fluidos de perforación y laboratorio), 2005.
- 11.** HALLIBURTON BAROID, Manual de fluidos de Baroid, 2005.
- 12.** KUEHL, Robert O. Diseño de Experimentos. Editorial Thomson Learning, 2 edición
- 13.** Md. Amanullah, SPE, CSIRO Petroleum, “Physio-Chemical Characterisation of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds”. Paper SPE 97008-MS
- 14.** M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0 Houston, Texas
- 15.** Programa Estratégico Para La Producción De Biodiesel Convenio UPME. Bogotá- 2003.
- 16.** Ramírez. Francisco. Mejora de la productividad con el uso de aditivos nacionales en fluidos de perforación. PDVSA. 2005
- 17.** RIBEIRO GALLO. Waldyr. Inception Workshop for the Implementation of the Strategic Partnership. Convenio proyecto CEPAL. Agosto 2007.
- 18.** RODRIGUEZ B. Eliserio. Guía de laboratorio de lodos y cementos. UIS. Bucaramanga 2007.

19. SCHLUMBERGER, Manual de fluidos, Febrero de 2001.
20. UGOLINI. Jorge. Estudio para determinar la factibilidad técnica y económica del desarrollo del biodiesel. Abril 2008.

# **ANEXOS**

**Anexo A. Registro fotográfico de las formulaciones preparadas.**

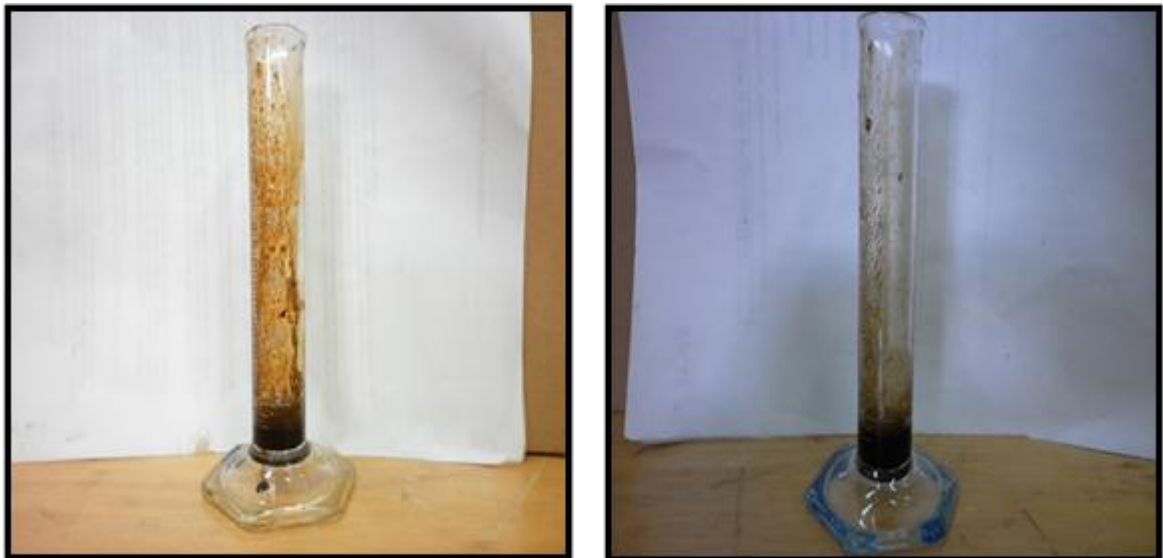
**Registro fotográfico formulación 100% diesel y biodiesel de soya respectivamente**

**Figura A.1. Formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**

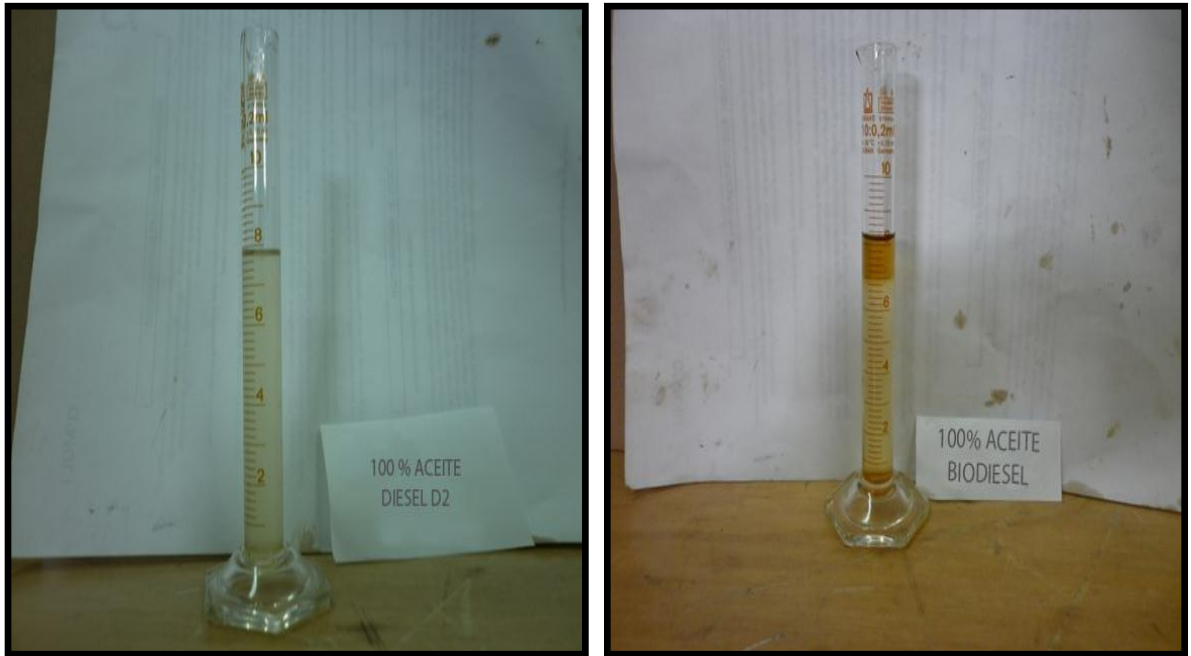


Fuente: Autores

**Figura A.2. Filtrado HPHT Formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.3. Contenido de sólidos y líquidos Formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.4. Cake Formulación 100% Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



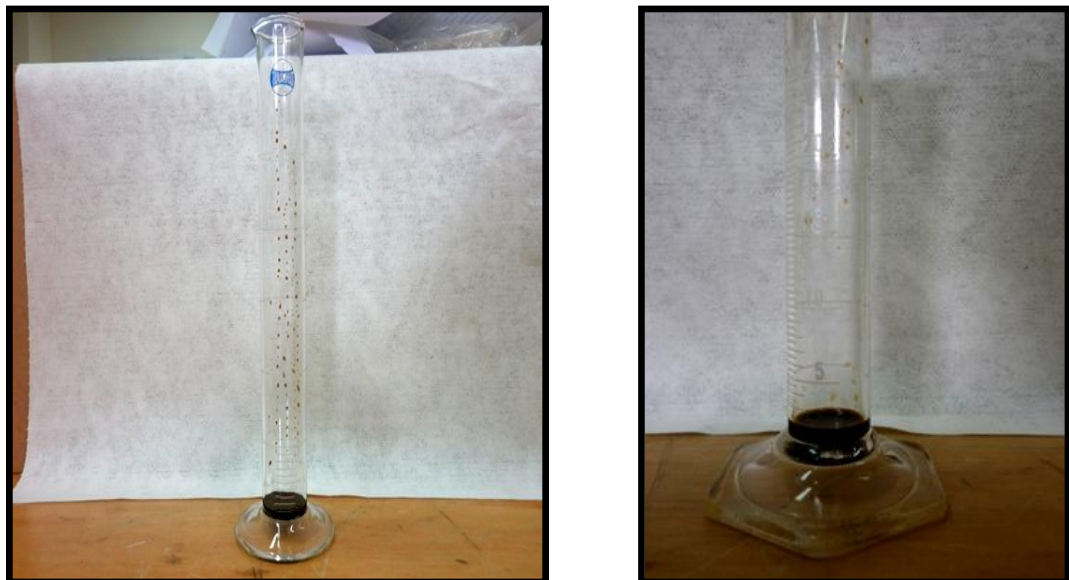
Fuente: Autores

**Registro fotográfico formulación emulsión firme 80/20 diesel y biodiesel de soya respectivamente**

**Figura A.5. Formulación Emulsión firme 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



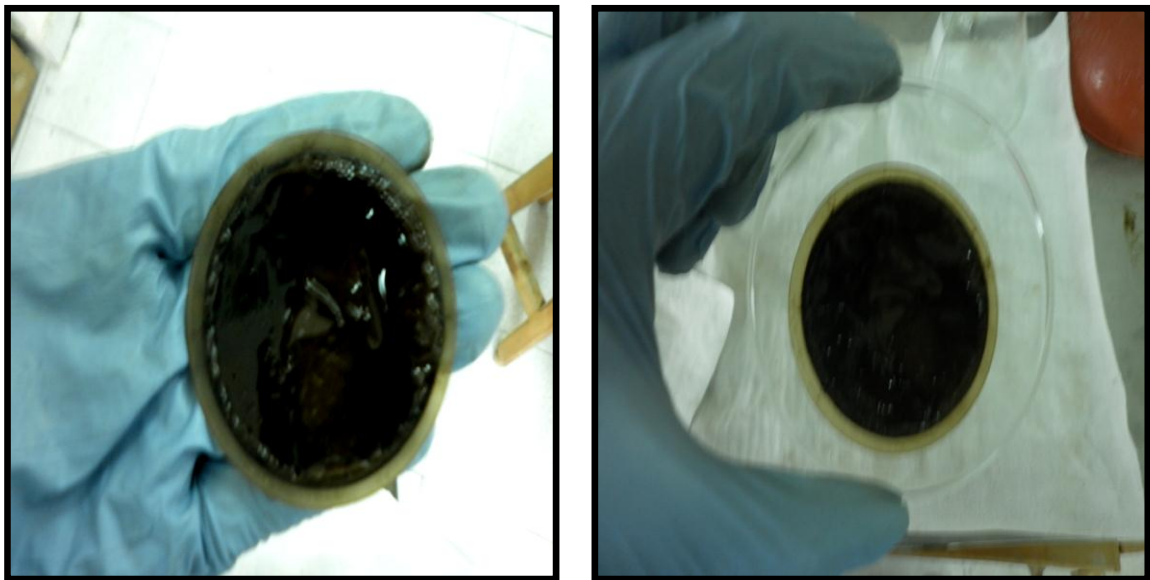
**Figura A.6. Filtrado HPHT Formulación Emulsión firme 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.7. Contenido de sólidos y líquidos Formulación Emulsión firme 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.8. Cake Formulación Emulsión Firme 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**

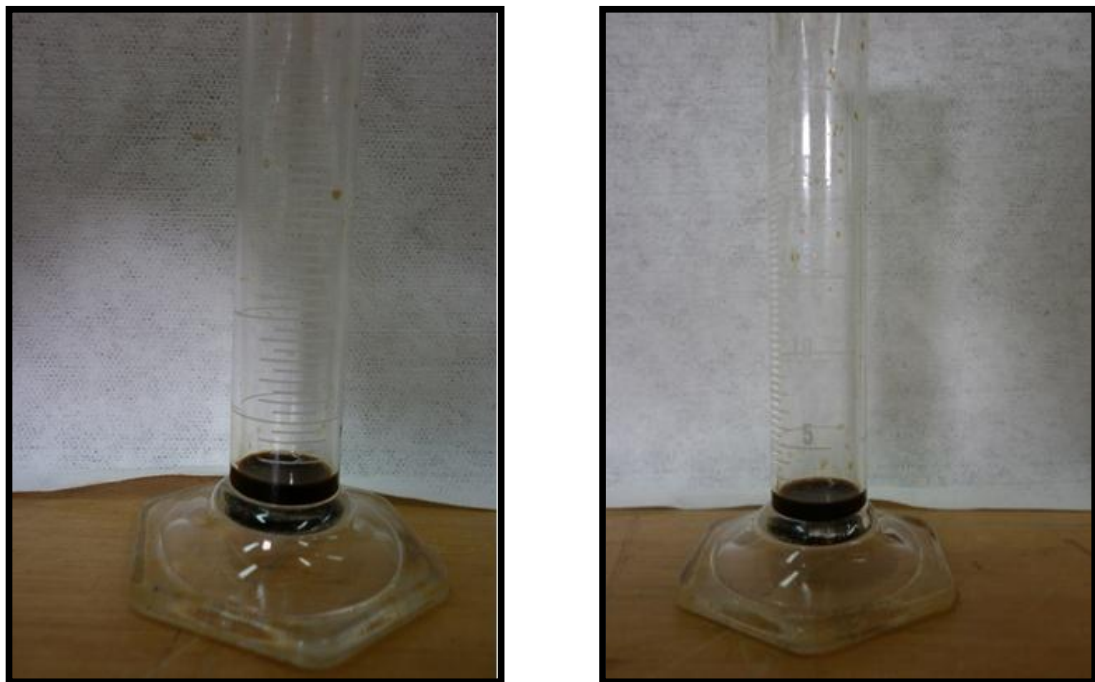


**Registro fotográfico formulación emulsión firme 70/30 diesel y biodiesel de  
soya respectivamente**

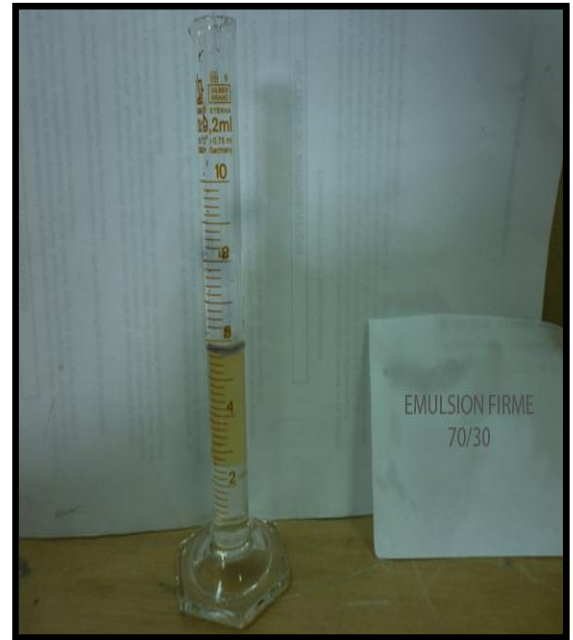
**Figura A.9. Formulación Emulsión firme 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.10. Filtrado HPHT Emulsión firme 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.11. Contenido de sólidos y líquidos Emulsión firme 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.12. Cake Emulsión firme 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



Fuente: Autores

**Registro fotográfico formulación filtrado relajado 80/20 diesel y biodiesel de  
soya respectivamente**

**Figura A.13. Formulación Filtrado relajado 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.14. Filtrado HPHT. Formulación Filtrado relajado 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya  
respectivamente**



**Figura A.15. Contenido de sólidos y líquidos. Formulación Filtrado relajado 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.16. Cake Formulación Filtrado relajado 80/20 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



Fuente: Autores

**Registro fotográfico formulación filtrado relajado 70/30 diesel y biodiesel de soya**

**Figura A.17. Formulación Filtrado relajado 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya**



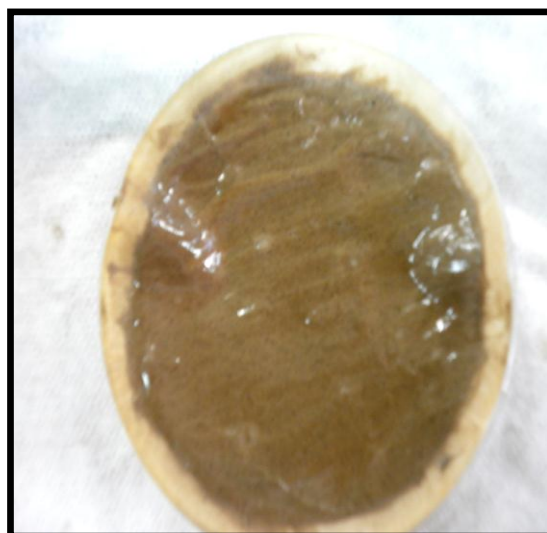
**Figura A.18. Filtrado HPHT. Formulación Filtrado relajado 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.19. Contenido de sólidos y líquidos. Filtrado relajado 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.20. Cake Filtrado relajado 70/30 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**

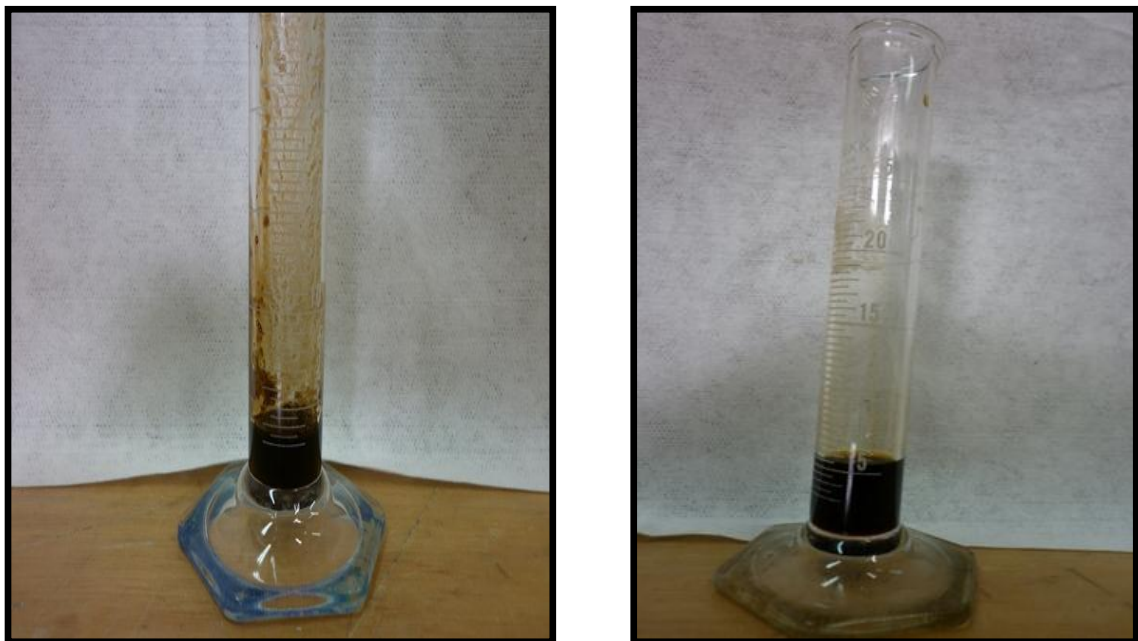


**Registro fotográfico formulación de alto % agua 50/50 diesel y biodiesel de soya respectivamente**

**Figura A.21. Formulación de Alto % Agua 50/50 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.22. Filtrado HPHT Formulación de Alto % Agua 50/50 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.23. Contenido de sólidos y líquidos Formulación de Alto % Agua 50/50 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.24. Cake Formulación de Alto % Agua 50/50 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Registro fotográfico formulación alto % agua 40/60 diesel y biodiesel de soya respectivamente**

**Figura A.25. Formulación Alto % Agua 40/60 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.26. Filtrado HPHT Formulación de Alto % Agua 40/60 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.27. Contenido de sólidos y líquidos Formulación de Alto % Agua 40/60 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



**Figura A.28. Cake Formulación de Alto % Agua 40/60 Diesel y Biodiesel de Soya respectivamente**



Fuente: Autores

**Figura A.29. Pruebas Químicas**



## Anexo B. Cálculos Tipo.

Para realizar las formulaciones fue necesario el uso de ciertos cálculos matemáticos, el modelo de éstos queda ilustrado en los siguientes ejemplos:

### Formulación del sistema 100% Aceite. Biodiesel De Soya

Tabla B.1 Formulación 100% Aceite Biodiesel De Soya

Formulación de 100 % Aceite			
Productos	9 lpg		
	G.E	Masa (gr)	Volumen (ml)
<b>Biodiesel de Soya</b>	0,875	<b>272,41</b>	<b>311,32</b>
<b>Emulsificante No. 2</b>	0,933	3,27	3,5
<b>Controlador de filtrado No 1</b>	1,05	8	7,62
<b>Emulsificante Pasivo-Humectante</b>	0.938	1,50	1,6
<b>Cal</b>	2,3	6	2,61
<b>Viscosificante</b>	1,7	8	4,71
<b>Densificante</b>	4,2	<b>78,30</b>	<b>18,64</b>
			<b>350</b>

De acuerdo al concepto de balance de materiales; el volumen total es igual a la suma de los volúmenes de los componentes individuales.

$$V_{\text{Total}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots$$

La masa total es igual a la suma de las masas de los componentes individuales.

$$V_{\text{Total}} \cdot \rho_{\text{Total}} = V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2 + V_3 \rho_3 + V_4 \rho_4 + \dots$$

Donde:

V = Volumen

$\rho$  = Densidad

m= masa

**Densidad del lodo ( $\rho$ ):**

$$\rho = 9 \text{ Lb/gal}$$

Se procede a calcular la masa del Biodiesel De soya y del densificante.  
La masa total del sistema se calcula a partir de la densidad del mismo por tanto

Despejando la masa:

$$\rho = (m/V) \cdot 8,345$$
$$(9 \cdot (350)) / 8,345 = m = 377,47 \text{ gr}$$

$$m (\text{Sistema}) = 377,47 \text{ gr}$$

$$m (\text{Aditivos}) = 26,77 \text{ gr}$$

$$\text{Volumen del Sistema} = 350 \text{ cc}$$

$$\text{Volumen de los Aditivos} = 20,03 \text{ cc}$$

Se plantea el siguiente sistema de ecuaciones para determinar la masa del Biodiesel de Soya y del densificante:

$$m (\text{Biodiesel}) + m (\text{densificante}) = m (\text{Sistema}) - m (\text{Aditivos})$$

$$\mathbf{m (\text{Biodiesel}) + m (\text{densificante}) = 350,71 \text{ gr}}$$

$$(m(\text{Biodiesel}) / 0,875) + (m(\text{densificante}) / 4,2) = \text{volumen sistema} - \text{volumen Aditivos}$$

$$\mathbf{(m(\text{Biodiesel}) / 0,875) + (m(\text{densificante}) / 4,2) = 329,97 \text{ cc}}$$

Resolviendo el sistema:

$$\mathbf{m (\text{Biodiesel}) = 272,41 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{m (\text{densificante}) = 78,30 \text{ gr}}$$

## Formulación de Emulsión Firme 70/30 Diesel

Tabla B.2 Formulación de Emulsión Firme 70/30. Diesel

Formulación de Emulsión Firme 9 lpg			
Productos	Relación: 70/30 O/W		
	G.E	Masa (gr)	Volumen (ml)
Aceite diesel	0,85	185,3	218
Salmuera @ 200.000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	93,43	98,97
		23,36	
		<b>116,79</b>	
Emulsificante No. 1	0,929	7,43	8
Controlador de filtrado No 1	1,05	8	7,62
Emulsificante No. 2	0,933	1,49	1,6
Cal	2,3	4	1,74
Viscosificante	1,7	3	1,76
Densificante	4,2	<b>51,46</b>	<b>12,25</b>
			<b>350</b>

Densidad del lodo

$$\rho = 9 \text{ Lb/gal} = 1,0785 \text{ gr/cc}$$

Relación aceite/agua = 70/30

Asumiendo un volumen de Aceite diesel de 218 cc calculamos el volumen de agua.

$$V_{\text{aceite}} = 218 \text{ cc}$$

$$D = m/V; \quad m = D * V_{\text{aceite}}$$

$$V_w = \frac{V_{\text{aceite}}}{\text{O/W}}$$

$$m_{\text{aceite}} = (0,85) * (218) = 185,3 \text{ gr}$$

$$V_w = \frac{218 \text{ cc}}{70/30} = 93,43 \text{ cc H}_2\text{O} \quad m_w = 93,43 \text{ gr H}_2\text{O} = \text{gr slv}$$

Procedemos a calcular la masa de cloruro de calcio que se ha de agregar al agua para obtener una concentración de la salmuera de 200.000 ppm. A partir de la siguiente ecuación.

$$\text{gr sto} = \frac{\text{ppm} * (\text{gr slv})}{10^6 * (1 - (\text{ppm}/10^6))}$$

$$\text{gr sto} = \frac{200.000 * (93,43)}{10^6 * (1 - (200.000 / 10^6))} = 23,36 \text{ gr}$$

$$m \text{ salmuera} = \text{gr solvente} + \text{gr soluto} = (93,43 + 23,36) \text{ gr} = 116,79 \text{ gr}$$

$$\text{Volumen salmuera} = 116,79 / 1,18 = 98,97 \text{ cc}$$

Calculamos la masa de densificante:

$$\text{Masa de densificante} = m \text{ Sistema} - m \text{ aceite} - m \text{ salmuera} - m \text{ aditivos}$$

$$\text{Masa de densificante} = (350 * 1,0785) - 185,3 - 116,79 - 23,92 = 51,46 \text{ gr}$$

Donde:

185,3 gr. es la masa del aceite Diesel

116,79 gr. es la masa de la salmuera.

23,92 gr. es la masa del resto de los aditivos sin tomar en cuenta el aceite y el material densificante.

grs sto: Gramos de Solutos

grs slv: Gramos del Solvente

m= masa