

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DE ADITIVOS ÓLEO-HUMECTANTES UTILIZADOS COMO DISPERSANTES EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rodríguez V., Ezequiel G
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DE ADITIVOS ÓLEO-HUMECTANTES UTILIZADOS COMO DISPERSANTES EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Francisco Yáñez

TUTOR INDUSTRIAL: Lic. María J Perozo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rodríguez V., Ezequiel G.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas 2015

Caracas, 15 de junio de 2015

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Ezequiel Rodríguez, titulado:

**“EVALUACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DE ADITIVOS
ÓLEO-HUMECTANTES UTILIZADOS COMO DISPERSANTES
EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE.”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. María Rodríguez
Jurado




Prof. José A. Sorrentino
Jurado


Prof. Francisco Yáñez
Tutor Académico


Lcda. Quím. María José Perozo
Tutor Industrial

Dedico este título a las personas que en todo momento y me obsequiaron su ayuda:

Maygualida Villanueva, Carlos G. Rodríguez

Mi amor Carina

Mis hermanos

Mi Abuela y Mis Tías

Mi Tío Miguel por ti estoy aquí como Ingeniero

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso, Jesucristo mi señor de Divina Misericordia y la Virgen María por ayudarme en la lucha diaria, brindarme su amor y su favor según su voluntad, dándome las fuerzas necesarias para cada día.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, que me obsequió su conocimiento dinámico y vital para seguir en mi carrera, me brindó la educación profesional. También dirigido a los Profesores y Amigos que colaboraron para mi formación como ingeniero y profesional, en la Escuela de Ingeniería Química como en Núcleo de Cagua.

A mi Madre y mi Padre, quienes me brindaron su apoyo incondicional, sus consejos, dirección y apoyo diario para seguir adelante.

Mis hermanos: Josué, Moisés, Daniel, Enrique, Carmen. Por siempre escucharme cuando necesitaba en los momentos más difíciles.

A mis Tías y mi Tío que siempre me ayudaron de manera espiritual, guiándome por el sendero del amor, tolerancia y disciplina.

A mi amor Carina, que me ayudó desde el primer momento con su amor incondicional para terminar la tesis y poder desarrollarme como ingeniero, dándome las fuerzas cuando pensaba que no podía más. Te amo Cari.

A mis amigos en la UCV, José Alejandro, Fernanda, Alfredo, Noris, Kelly Saúl, Julio, Jozy's, Raúl, Jean, Kevin, Hilmar, Nelson, Luis Rodríguez, Luis Roca, Adrián, Manuel paí, Pastor, Ramón, Jorge. Gracias por su amistad, el éxito siempre se encuentre con ustedes.

Un agradecimiento especial a mis tutores del trabajo especial de grado. María José Perozo y el Prof. Francisco Yáñez, gracias por darme su ayuda, paciencia y generosidad en el momento en que los necesité. Mi agradecimiento a todo el equipo de PDVSA-Intevep, por tomarse el tiempo de colaborar conmigo en todo y en las pruebas de laboratorio,, específicamente a Yacuelín Sandoval, Mayerling Morales, Cesar Barreto, Franklin Quintero, Rosalba Hernández. Mis amigos tesistas y pasantes Roberto, Alix, Miguel, Héctor, Mariana, Eduardo, William, Johana, Adriana quienes me acompañaron al tiempo de estar en la empresa, Gracias!!!

Rodríguez V. Ezequiel G

**EVALUACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO DE ADITIVOS
ÓLEO-HUMECTANTES UTILIZADOS COMO DISPERSANTES
EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE.**

Tutor académico: Prof. Francisco Yánez. Tutora industrial: Lcda. Quím.

María José Perozo. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Química Año 2015, 103p.

Palabras Claves: Óleo-humectantes, Dispersantes, Fluidos de Perforación, Estabilidad de dispersión, Mojabilidad, Reología, Base aceite.

Resumen. Actualmente los aditivos dispersantes y surfactantes empleados en la industria petrolera venezolana son importados. Para producir valor agregado nacional en PDVSA-Intevep se está investigando, desarrollando y evaluando aditivos de manufactura y materia prima nacional. Por lo tanto, es objetivo del presente Trabajo Especial de Grado, la evaluación a escala de laboratorio de aditivos óleo-humectantes utilizados como dispersantes en fluidos de perforación base aceite. Para el cumplimiento de los objetivos específicos fue necesario caracterizar la materia prima y determinar la proporción de ácidos grasos saturados e insaturados presentes, luego de sintetizar se realizó el estudio de la capacidad de alteración de la mojabilidad de superficies hidrofílicas por los surfactantes, además de determinar la estabilidad de dispersión de sólidos y la reología ofrecida por fluidos base aceite con dichos dispersantes sintetizados. Estas dieron como resultado que los aditivos A1, A3 y A4 con proporciones de ácidos grasos insaturados de 42-85%, obtuvieron mayores desempeños en pruebas de cambio de mojabilidad, estabilidad de dispersión y desempeño reológico en fluidos de perforación base aceite.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 ANTECEDENTES	4
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	8
2.1 FLUIDOS DE PERFORACIÓN	8
2.1.1 Definición de fluido de perforación.	8
2.1.2 Funciones de los fluidos de perforación.	8
2.1.3 Propiedades fundamentales de los fluidos de perforación.	9
2.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.	10
2.2.1 Viscosidad	11
2.2.2 Fuerza de gel.	13
2.3 TENSOACTIVOS Y SURFACTANTES	14
2.3.1 Clasificación de surfactantes	15
2.4 DISPERSIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO	16
2.4.1 Óleo-Humectantes y dispersantes	17
2.4.2 Adsorción de surfactantes	17
2.4.3 Estabilidad de dispersión	18
CAPÍTULO III	
MARCO METODOLÓGICO	20

3.1	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	20
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
3.3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.3.1	Revisión bibliográfica continua.....	21
3.3.2	Caracterización de los productos comerciales y sintetizados en Intevep-PDVSA.....	22
3.3.3	Pruebas de funcionalidad físico-química.....	22
3.3.4	Pruebas de desempeño reológico en fluidos de perforación base aceite	22
3.3.5	Selección.....	22
3.4	DEFINICIÓN DE VARIABLES E INDICADORES	23
3.4.1	Ángulo de contacto.....	23
3.4.2	Delta de Backscattering 90 minutos (DBS)	23
3.4.3	Reología antes y después de envejecer	25
3.5	MUESTRAS A EVALUAR	25
3.6	TÉCNICAS, PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS, PREPARACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS.....	26
3.6.1	Ángulo de contacto.....	26
3.6.2	Estabilidad de Dispersión.....	27
3.6.3	Desempeño reológico de fluidos de perforación	28
3.7	ANÁLISIS DE DATOS	32
3.8	LIMITACIONES.....	33
CAPITULO IV		
	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	34
4.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS SURFACTANTES EVALUADOS	34
4.1.1	Número de acidez total	34
4.1.2	Proporción de saturados e insaturados.....	35
4.2	CAMBIO DE MOJABILIDAD	36
4.3	DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD DE DISPERSIÓN.....	41

4.3.1	Estabilidad de dispersión de sólidos por los óleo-humectantes	41
4.3.2	Relación entre la proporción de ácidos saturados e insaturados en estabilidad de dispersión.	56
4.4	DESEMPEÑO REOLÓGICO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE	58
4.4.1	Desempeño reológico a 6 Lpb.....	58
4.4.2	Desempeño reológico a 2 Lpb.....	61
4.5	EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE OLEOHUMECTANTES.....	67
4.5.1	Evaluación de cambio de mojabilidad	67
4.5.2	Evaluación de estabilidad de dispersión	68
4.5.3	Evaluación del desempeño reológico.....	69
4.5.4	Evaluación general.....	70
CAPITULO V		
CONCLUSIONES		73
RECOMENDACIONES		75
CAPITULO VI		
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		76
APENDICE A		79
APENDICE B		80
APENDICE C		84
APENDICE D.....		85

INDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Representación gráfica de modelo reológico de plástico de Bingham.....	11
Figura N°2. Tipo de geles.	14
Figura N°3. Adsorción en una interfase Sólido-Líquido.	18
Figura N°4. Estabilidad de dispersión debido a fuerzas de cohesión-dispersión (modificado Salager, 2002).....	19
Figura N°5. Diagrama de la metodología de la investigación empleada.....	21
Figura N°6. Ángulo de contacto entre una gota de líquido y un sólido.....	23
Figura N°7. Esquema de transmisión y backscattering en Turbiscan LAB ...	24
Figura N°8. Procedimiento de medición del ángulo de contacto de la gota posada.....	26
Figura N°9. Equipo de medición de ángulo de contacto OCA20.....	27
Figura N°10. Procedimiento de medición de backscattering para la evaluación de la estabilidad de dispersión.	28
Figura N°11. Equipo de medición de Backscattering Turbiscan Lab.	28
Figura N°12. Procedimiento prueba de reología, a fluidos de perforación base aceite antes y después de envejecer.....	29
Figura N°13. Mezclador Hamilton Beach Commercial.....	30
Figura N°14. Balanza electrónica Mettler PM6100.....	30
Figura N°15. Viscosímetro rotacional OFITE modelo 800.....	31
Figura N°16. Celda de rolado OFITE.....	31
Figura N°17. Proporción de cadenas insaturadas y saturadas de los aditivos sintetizados.....	35
Figura N°18. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en aceite sin surfactante.....	37
Figura N°19. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en solución aceite con H1.....	38
Figura N°20. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en solución aceite con A4.....	39
Figura N°21. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en soluciones de aceite-dispersante con ángulos de contacto menores a 90°.....	40
Figura N°22. Backscattering 90 minutos para una formulación base sin surfactante.....	42

Figura N°23. Dispersión de sólidos sin surfactante antes y después de yacer estática por 90 minutos.....	43
Figura N°24. Porcentaje de DBS para dispersiones a distintas concentraciones de dispersante A4.....	44
Figura N°25. Curvas de backscattering a distintas concentraciones de A4 ..	45
Figura N°26. Curvas de backscattering para fluido con aditivo H1.....	47
Figura N°27. Comparación de los criterios utilizados del blanco, el criterio DBS-A y el aditivo de referencia con los aditivos sintetizados	48
Figura N°28. Curvas de Backscattering para las dispersiones con los aditivos A1, A3 y A4.....	50
Figura N°29. Curvas de Backscattering de la dispersión con el aditivo A2... ..	50
Figura N°30. Dispersiones de A2 luego de 90 minutos en reposo.....	51
Figura N°31. Curvas de Backscattering de la dispersión con el aditivo A6... ..	51
Figura N°32. Dispersión de A6 en 90 minutos (Prueba 1)	52
Figura N°33. Curvas Backscattering para aditivos A5 y A7 (prueba 1).....	53
Figura N°34. Dispersiones de A5 (prueba 3) y A7 (prueba 1) luego de 90 minutos.	54
Figura N°35. Curvas de Backscattering para dispersiones formuladas con A1, A3 y A4	55
Figura N°36. Aditivos sintetizados con mejor rendimiento en la dispersión de sólidos.....	55
Figura N°37. Relación entre valor DBS-A y la proporción de saturados e insaturados de aditivos sintetizados.. ..	56
Figura N°38. Relación entre valor DBS-B y la proporción de saturados e insaturados de aditivos sintetizados.	57
Figura N°39. Viscosidad plástica de fluidos formulados con una concentración de 6 Lpb.....	59
Figura N°40. Punto Cedente los fluidos formulados, antes y después del envejecer a 6 Lpb	60
Figura N°41. Variación de la viscosidad plástica para los fluidos formulados a 2 Lpb, antes y después del envejecimiento	64
Figura N°42. Punto Cedente los fluidos formulados a 2 Lpb, antes y después del envejecimiento	65
Figura N°43. Curvas de backscattering para aditivo A1.....	79
Figura N°44. Curvas de backscattering para aditivo A2.....	80

Figura N°45. Curvas de backscattering para aditivo A3.....	80
Figura N°46. Curvas de backscattering para aditivo A4.....	81
Figura N°47. Curvas de backscattering para aditivo A5.....	81
Figura N°48. Curvas de backscattering para aditivo A6.....	82
Figura N°49. Curvas de backscattering para aditivo A7.....	82
Figura N°50. Curvas de backscattering para aditivo de referencia H1	83

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Muestras de dispersantes a evaluar.	25
Tabla N°2. Formulación del fluido modelo para la prueba de estabilidad de dispersión.....	27
Tabla N°3. Formulación base de fluido de perforación densificado a 11,5 Lpg.....	29
Tabla N°4. Técnicas empleadas para la caracterización de las muestras de dispersantes.....	32
Tabla N°5. Análisis y criterios a utilizar para los datos de pruebas de desempeño.	33
Tabla N°6. Valores de número de acidez total de los productos.....	34
Tabla N°7. Valores de ángulo de contacto de óleo-humectantes evaluados y el blanco.....	36
Tabla N°8. Valores de DBS para las regiones A y B de la dispersión sin surfactante	43
Tabla N°9. Valores de Delta Backscattering para la región A de fluidos con aditivos evaluados a 6 Lpb.....	46
Tabla N°10. Valores de Delta Backscattering para la región B de los aditivos evaluados.....	49
Tabla N°11. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 6 Lpb antes de envejecer	58
Tabla N°12. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 6 Lpb después de envejecer a 300°F y 150 psi	59
Tabla N°13. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 2 Lpb antes de envejecer.....	61
Tabla N°14. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 2 Lpb después de envejecer a 300°F y 150 psi	63
Tabla N°15. Porcentaje de variación de la viscosidad plástica de los fluidos de perforación, antes y luego de envejecer	64
Tabla N°16. Clasificación de geles de los fluidos formulados antes y después de envejecer	66
Tabla N°17. Evaluación de oleohumectantes según prueba de cambio de mojabilidad por ángulo de contacto	68
Tabla N°18. Evaluación de oleohumectantes en prueba de estabilidad de dispersión.....	69

Tabla N°19. Evaluación de oleohumectantes en prueba de estabilidad de dispersión.....	69
Tabla N°20. Evaluación general de dispersantes.	70
Tabla N°21. Estadística de mediciones de ángulo de contacto de gota posada.	78
Tabla N°22. Valores estadísticos de DBS para la región A	84
Tabla N°23. Valores estadísticos de DBS para la región B	84
Tabla N°24. Valores de lecturas y desempeño reológico de fluidos formulados a 2 Lpb prueba 1	85
Tabla N°25. Valores de lecturas y desempeño reológico de fluidos formulados a 2 Lpb prueba 2.	86
Tabla N°26. Valores de lecturas y desempeño reológico de fluidos formulados a 2 Lpb prueba 3	87
Tabla N°27. Desviación estándar de lecturas y valores de desempeño reológico de fluidos formulados	88

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

A continuación se listan abreviaturas y símbolos por orden de aparición

- W/O: Emulsión de agua en aceite
- O/W: Emulsión aceite en Agua
- H₂S: Gas de sulfuro de hidrógeno
- CO₂: Dióxido de carbono
- API: American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
- FOB: Free on Board
- INE: Instituto Nacional de Estadística
- PDVSA: Petróleos de Venezuela S.A.
- INTEVEP: Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (PDVSA)
- SiO₂: Sílice (Óxido de Silicio)
- CIED: Centro Internacional de Educación y Desarrollo
- Lpg: Libras por galón
- Kg/L: Kilogramos por Litro
- Lb/ft³: Libras por pie cubico
- VP: Viscosidad Plástica
- YP o PC: Yield Point o Punto Cedente
- rpm: revoluciones por minuto
- cP: centiPoise
- GC-MS: Cromatografía de Gas y Espectrometría de Masas
- TAN: Total Number Acid (número de acidez total)
- BS: Backscattering
- DBS: Delta de backscattering
- Lpb: Libras por barril
- STQA: Servicio Técnico de Química Analítica (INTEVEP)
- KOH: hidróxido de potasio
- I/S proporción entre ácidos grasos insaturados y saturados

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los fluidos de perforación representan el eslabón principal de la construcción de un pozo petrolero, debido que cumplen una serie de funciones que permiten llevar el proceso de perforación de una manera óptima. Generalmente estos fluidos pueden clasificarse de acuerdo a su fase continua en: fluidos base agua y base aceite.

Los Fluidos base aceite son aquellos cuya fase continua, es aceite y pueden ser del tipo emulsión inversa (w/o) o 100% aceite. Estos sistemas se caracterizan por dar alta lubricidad lo que disminuye problemas de torque y arrastre. El uso de los fluidos base aceite se justifica para perforar: formaciones sensibles al agua, hoyos con altas temperaturas, zona productora de gases ácidos (H_2S/CO_2), zonas de bajo gradiente, domos de sal, pozos direccionales (CIED, 2002). En la formulación de estos fluidos se requiere en muchos casos el uso de surfactantes, los cuales cumplen dos funciones principales: estabilizar emulsiones, y actuar como agente humectante. Esta última propiedad es de principal importancia para fluidos 100% aceite, debido a que los sólidos (barita, arcillas y sólidos perforados) deben ser humectados por la fase continua líquida, de lo contrario estos se agregarían y se depositarían (Instituto Americano del Petróleo, 2001).

En la realización de este trabajo de investigación se pretende como objetivo principal: evaluar a escala de laboratorio aditivos óleo-humectantes utilizados como dispersantes en fluidos de perforación base aceite. Para el cumplimiento del mismo, se plantean pruebas de: a) caracterización química (Número de acidez total, cromatografía de gas con espectrometría de masas), b) fenómenos interfaciales (cambio de mojabilidad, estabilidad de dispersión) y c) desempeño en fluidos de perforación 100% aceite.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la industria petrolera se encuentra representada por una cadena de valor la cual comprende: exploración, perforación, producción, transporte, refinación y comercialización de productos. Siendo la perforación de pozos un eslabón de importancia vital para la extracción del petróleo, es de esperar que las investigaciones y desarrollos de tecnologías avancen en sentido de mejorar este proceso. En la perforación se estima un gasto por concepto de fluidos de perforación de 10% del total del mismo.

Algunas de las funciones de los fluidos de perforación son: remover los ripios o cortes de las rocas trituradas por el taladro, mantener en suspensión las partículas sólidas, enfriar y lubricar la sarta de perforación, mantener la presión hidrostática del pozo entre otros. Estos fluidos requieren ciertas propiedades fisicoquímicas que ayudan a construir de manera segura, eficaz y acorde con el medio ambiente, los pozos que transportan a la superficie el crudo que se encuentra a cientos de metros bajo la superficie entre capas de roca, arenas y arcillas, tales propiedades de gran importancia son: viscosidad, densidad, gelificación y velocidad de circulación de fluido.

A estos fluidos se le añaden aditivos que mejoran estas propiedades, las cuales se clasifican dependiendo de su uso en: viscosificantes, densificantes, activadores polares, controlador de filtrado y surfactantes (de tipo no-iónicos que son generalmente utilizados como dispersantes de sólidos o emulsionantes). Los fluidos de perforación base aceite requieren el uso de

surfactantes que ayudan a humectar los sólidos con aceite. Los fluidos de perforación base aceite se emplean en formaciones con presencia de domos de sal, ya que los fluidos base agua pueden solubilizar las sales y generar inestabilidad en el pozo.

Siendo Venezuela un país con las más grandes reservas probadas de crudo del mundo, es lógico que se tenga un alto mercado nacional en aditivos de fluidos de perforación. En la actualidad, tan solo para agentes de superficie no-iónicos se registraron importaciones por 1.727 Toneladas en el 2013 con un gasto FOB de 8.138.483,83 \$, (INE, 2014). Por estas razones es de sumo interés para el país, desarrollar y evaluar insumos nacionales que puedan sustituir los componentes o aditivos de lodos, que son importados, para así minimizar costos y aumentar la soberanía tecnológica, todo enmarcado en el plan de la patria 2013-2019 y el plan siembra petrolera 2005-2030 que involucran desarrollar tecnología de calidad.

Por lo tanto, en el presente trabajo se realiza la evaluación a escala de laboratorio de aditivos óleo-humectantes desarrollados con materia prima nacional, en fluidos de perforación base aceite. Estos se compararán con aditivos importados actualmente usados en las operaciones de perforación, para determinar su desempeño.

La investigación contará con una metodología de evaluación de aditivos, desarrollada en PDVSA-Intevep, la cual integra análisis y evaluaciones diferentes: caracterización analítica de los productos con pruebas de, número de acidez total, cromatografía de gas con espectrometría de masas y evaluación mediante pruebas funcionales como cambio de mojabilidad, estabilidad de dispersión de sólidos, y pruebas de desempeño en fluidos de perforación base aceite, que incluye la medición de propiedades reológicas del fluido base aceite antes y después de envejecer.

1.2 ANTECEDENTES

Mengual, Meunier, Cayré, Puech, Snabre (1999). Realizaron el estudio en el equipo Turbiscan MA 2000 para la medición de dispersión de luz múltiple enfocado al análisis de inestabilidad, de emulsiones y suspensiones concentradas. En este trabajo primero se describe el principio de medición del instrumento Turbiscan MA 2000. En la segunda parte se presentaron los principios y resultados concernientes a la dispersión de luz múltiple por una suspensión en una celda de medición de vidrio cilíndrico y celda plana. Por último presentan ejemplos de desestabilización de dispersiones de microesferas de látex (variando el tamaño y concentración de partículas) concluyendo finalmente que la retrodispersión medida por el equipo depende principalmente de la longitud de transporte de fotones de luz y permite detectar distintos fenómenos como la migración de partículas (sedimentación, cremado, clarificación) y las variaciones de tamaño de las partículas (coalescencia, floculación) por agregación entre ellas.

Álvarez (2002) realizó el estudio del efecto de la adición del compuesto Z-Trol 60 como emulsificante y humectante en fluidos de perforación base aceite (100% aceite, O/W: 90/10, 80/20, 70/30). Los fluidos formulados con el compuesto Z-Trol 60 se les determinaron las propiedades reológicas para luego someter dichos fluidos a envejecimiento con el fin de determinar la variación de sus propiedades reológicas y fisicoquímicas. Se obtuvo como resultado que el aditivo es capaz de cumplir con las condiciones mínimas de los fluidos de perforación en viscosidad plástica y punto cedente con alta resistencia a la temperatura, pero no contribuye favorablemente a la tixotropía (fuerza de gel) de los sistemas evaluados. Finalmente recomienda continuar las investigaciones a fin de modificar químicamente el producto para satisfacer con las necesidades de perforación en Venezuela y de su industria petrolera.

Ayala (2004) evaluó aditivos sintetizados con aceites vegetales de origen nacional para lodos de perforación. Consistió en evaluar el comportamiento de los aditivos sintetizados como agentes humectantes y emulsionantes secundarios en fluidos de perforación base aceite. Dicho trabajo se dividió en dos etapas, la etapa inicial residió en la síntesis de tres aditivos a partir de ácidos grasos vegetales nacionales y poliaminas, la etapa final en la evaluación de propiedades reológicas y fisicoquímicas de fluidos de perforación formulados con los aditivos sintetizados. Se encontró que los surfactantes sintetizados poseían potencial tanto como emulsionantes, como de humectantes, y recomendaron realizar técnicas analíticas como espectrometría de infrarrojos, espectrometría de masas o resonancia magnética, para la caracterización de los productos elaborados, y también proponen la búsqueda de otros compuestos nacionales que apliquen como humectantes y emulsionantes.

Skalli, Buckley, Zhang y Morrow (2006). Presentaron el estudio de efectos de mojado de superficies y núcleos de Berea, por surfactantes en fluidos de perforación base aceite. El trabajo consistió en la evaluación de cinco emulsificantes humectantes de los cuales se les determinó previamente la concentración micelar crítica a diferentes niveles de pH. Los aditivos fueron preparados en soluciones de n-decano tomando en cuenta los valores del ángulo de contacto para 2, 5 y 10 minutos, de una gota de una solución buffer sobre una superficie de mica. Luego se comparó el efecto de la adición de Ez-mul a núcleos de Berea de arena muy mojables y poco al agua, y se determinó un cambio de mojabilidad de los núcleos al aceite debido a la acción de los surfactantes evaluados, incluso a bajas concentraciones de los surfactantes. Se concluyó que efectos de no equilibrio pueden hacer que las superficies sean temporalmente muy mojables al aceite.

Meléndez (2007). Realizó el estudio de la alteración de la mojabilidad mediante el uso de un surfactante natural en el sistema aceite/agua/SiO₂. Se

evaluó un surfactante comercial no iónico y un surfactante natural iónico, realizando una caracterización fisicoquímica con espectroscopia de rayos X y espectroscopia de infrarrojos para luego evaluar los surfactantes en función al cambio de mojabilidad de una superficie mineral de sílice del aceite (fluido que simula al petróleo en el yacimiento) al agua, mediante el método de ángulo de contacto de la gota posada. Como resultado se corroboró la factibilidad de uso de la técnica de espectroscopia de rayos X y de medición del ángulo de contacto para la determinación del cambio de mojabilidad de las superficies, también la factibilidad de uso de surfactantes naturales como alterantes de la mojabilidad de superficies minerales.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar a escala de laboratorio aditivos óleo-humectantes utilizados como dispersantes en fluidos de perforación base aceite.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar aditivos óleo-humectantes comerciales importados y productos desarrollados en PDVSA-Intevep mediante las técnicas analíticas: Número de acidez total y cromatografía de gas con espectrometría de masas.
- Determinar los cambios en la mojabilidad de soluciones de aceite mineral, debido a la adición de los aditivos óleo-humectantes comerciales importados y desarrollados en PDVSA-Intevep, sobre una superficie mineral hidrofílica a través de mediciones de ángulo de contacto.
- Determinar el desempeño de los aditivos óleo-humectantes comerciales importados y productos desarrollados en PDVSA-Intevep en la estabilidad de dispersión sólidos en un fluido base aceite modelo.

- Determinar y evaluar las propiedades reológicas de fluidos de perforación mediante una formulación base 100% aceite, evaluando los aditivos comerciales importados y los aditivos desarrollados en PDVSA-Intevep.
- Evaluar aditivos óleo-humectantes y seleccionar mediante resultados obtenidos en pruebas de estabilidad de dispersión, mojabilidad y desempeño en fluidos de perforación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

2.1.1 Definición de fluido de perforación.

El fluido de perforación o lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, como por ejemplo: aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos. El fluido no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable, pero sí inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales y estable a las altas temperaturas. Además, debe mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones, debe ser inmune al desarrollo de bacterias (CIED, 2002).

2.1.2 Funciones de los fluidos de perforación.

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 siguientes (Instituto Americano del Petróleo, 2001):

- Retirar los recortes del pozo.
- Controlar las presiones de la formación.
- Suspender y descargar los recortes.

- Obturar las formaciones permeables.
- Mantener la estabilidad del pozo.
- Minimizar los daños al yacimiento.
- Enfriar, lubricar y apoyar la barrena y el conjunto de perforación.
- Transmitir la energía hidráulica a las herramientas y a la barrena.
- Asegurar una evaluación adecuada de la formación.
- Controlar la corrosión.
- Facilitar la cementación y la completación.
- Minimizar el impacto al ambiente.

2.1.3 Propiedades fundamentales de los fluidos de perforación.

Durante la perforación de un pozo petrolero es importante el control de las propiedades de los lodos. Para que esto sea posible es importante conocer cuáles son las propiedades a controlar.

2.1.3.1 Densidad del fluido

Una de las principales propiedades del fluido es la densidad, cuya función es mantener las paredes del hoyo sin que colapsen durante la perforación, y evitar arremetidas de los fluidos presentes en el pozo. La densidad de un fluido de perforación suele ser expresada en libras por galón (Lpg), kilogramo por litro (Kg/l) y libras por pie cúbico (lb/ft³). Muchas veces se usa “peso” para hacer referencia a la densidad. En fluidos de perforación suelen estar entre densidad del aire, básicamente 0 Lpg, hasta más de 20 Lpg

2.1.3.2 Propiedades reológicas

La reología es una propiedad sumamente importante de los lodos de perforación. La reología del lodo se mide continuamente durante la perforación y se ajusta con aditivos o dilución para cumplir con las necesidades de la operación.

2.1.3.3 Pérdida de filtrado

Es la medición de la cantidad relativa de fluido perdido (filtrado) a través de las formaciones permeables cuando se somete el fluido a una diferencia de presión. La pérdida de fluido depende de la permeabilidad rocosa, el diferencial de presión existente, composición y temperatura de fluido.

2.1.3.4 Contenido de sólidos

En un fluido de perforación existen sólidos necesarios como la arcilla y la barita (densificante), y sólidos no necesarios como ripios y arena, los cuales hay que eliminar del sistema. Los sólidos de perforación o ripios cuando no son controlados, es uno de los mayores problemas que presentan los fluidos de perforación. La acumulación de sólidos en el sistema causa la mayor parte de los gastos de mantenimiento del fluido. Alguno de los efectos de un aumento de los sólidos de perforación son: incremento del peso (densidad) del fluido, alteración de propiedades reológicas (aumento de la viscosidad plástica). Reducción de vida útil de los equipos (mecha, bomba, tuberías) debido a la corrosión, mayor pérdida de presión por fricción entre otras.

2.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

Anteriormente se definió la importancia que poseen las propiedades reológicas del fluido a la perforación. Ahora se muestra específicamente cuales de estas propiedades son fundamentales. Para la medición de dichas propiedades se emplea un viscosímetro rotacional de lectura directa, el cual determina las características de flujo de los aceites y los fluidos de perforación en términos de velocidad de cizallamiento y la tensión de cizallamiento sobre diversos tiempos y rangos de temperatura a presión atmosférica (OFITE, 2013).

2.2.1 Viscosidad.

Es la resistencia que ofrece un fluido a deformarse (a fluir). Los fluidos de perforación se rigen generalmente por el modelo de flujo plástico de Bingham, este modelo describe un fluido en el cual se requiere una fuerza finita para iniciar el flujo (punto cedente) y que luego demuestra una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta (viscosidad plástica). Como se muestra en la figura N°1 se ilustra un perfil de flujo verdadero de un fluido de perforación con el modelo ideal de Flujo Plástico de Bingham.

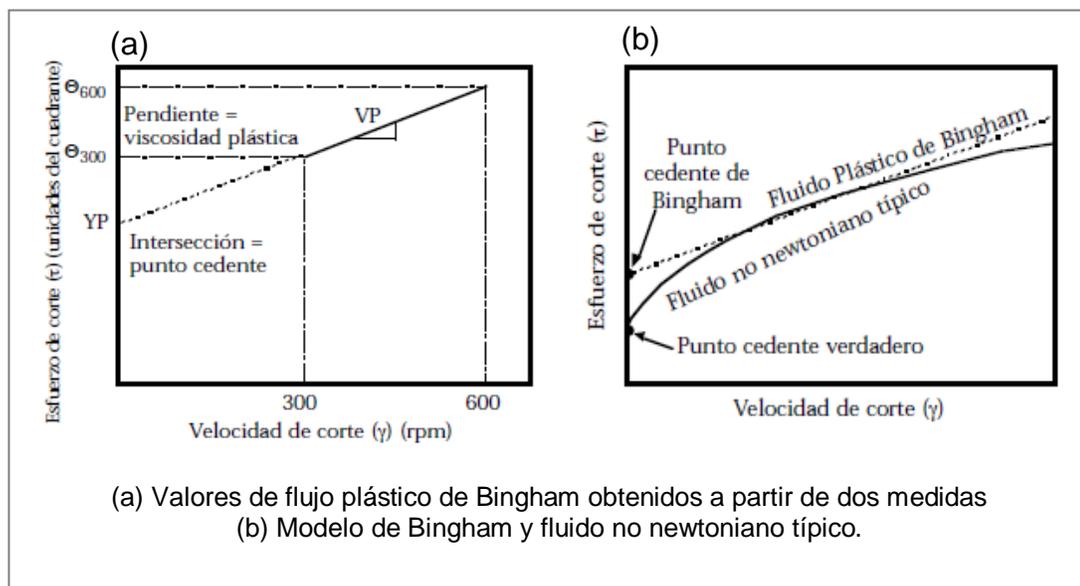


Figura N°1. Representación gráfica de modelo reológico de plástico de Bingham (Modificado Instituto Americano de Petróleo, 2001).

En la figura N°1 muestra no solamente la comparación entre el “punto cedente verdadero” y el punto cedente de Bingham, sino también la desviación de la viscosidad a bajas y altas velocidades de corte en comparación con la viscosidad plástica de Bingham. El punto cedente de Bingham es más alto que el esfuerzo de cedencia verdadero.

2.2.1.1 Viscosidad plástica

Es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica entre:

- Sólidos
- Sólidos y líquidos
- Líquido y líquidos

Esta viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido, y se controla con equipos mecánicos de Control de Sólidos. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración. Una baja viscosidad plástica aunada a un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración. Para determinar la viscosidad plástica se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathbf{VP = Lectura\ 600rpm - Lectura\ 300rpm} \quad (1)$$

Dónde:

VP: Viscosidad Plástica, cP.

Lectura 600rpm: valor del dial a 600 rpm en el viscosímetro, cP.

Lectura 300rpm: valor del dial a 300 rpm en el viscosímetro, cP.

2.2.1.2 Punto de cedencia.

Es el valor de cedencia, es decir el esfuerzo mínimo que ha de ser aplicado para que un sistema fluya. Este es causado por la interacción entre las partículas sólidas tales como las arcillas, que poseen capacidad viscosificante. Esta interacción es el resultado de las cargas positivas localizadas en la superficie y las aristas de las láminas de arcilla. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incrementos por la acción de los contaminantes, floculación del sistema, aumento de concentración de cargas eléctricas de diferente polaridad en la fase líquida. Se ha encontrado que la velocidad de asentamiento de los cortes, cuando se está perforando,

se correlaciona de manera más exacta con el punto cedente más que cualquier otro parámetro. El valor mínimo recomendado para el punto de cedencia es de 5 Lb/100pies². Para determinar este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$PC = \text{Lectura 300rpm} - VP \quad (2)$$

Dónde:

PC: punto cedente, lb/100pies².

2.2.2 Fuerza de gel.

Esta resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas, se representa en unidades de lb/100pies². Las mediciones comunes de esta propiedad se toman a los diez segundos y a los diez minutos, pero pueden ser medidas para cualquier espacio de tiempo deseado (CIED, 2002). La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico. La magnitud de la gelificación, así como el tipo de esfuerzo de gel, es importante en la suspensión de los recortes y del material densificante. No se debe permitir que la gelificación alcance un nivel más alto del necesario para cumplir estas funciones. A continuación se presenta una clasificación de los tipos de geles:

- Geles frágiles, poseen valores extremadamente bajos, donde los geles a los 10 segundos y a los 10 minutos son casi idénticos, por ejemplo 1/1, 2/2 y 2/3 etc.
- Geles favorables, son aquellos que tienen valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos, por ejemplo 2/4, 3/6 y 4/8 etc.

- Geles progresivos, tienen valores intermedios a los 10 segundos, luego se incrementan rápidamente hasta valores muy elevados a los 10 minutos por ejemplo 3/20, 6/35,8/50.
- Geles instantáneos, tienen valores casi idénticos a los 10 segundos ya los 10 minutos, sin embargo estos valores, en algunos casos pueden ser muy elevados, por ejemplo 20/21, 30/32.

En la figura N°2 se visualiza los tipos de geles mencionados.

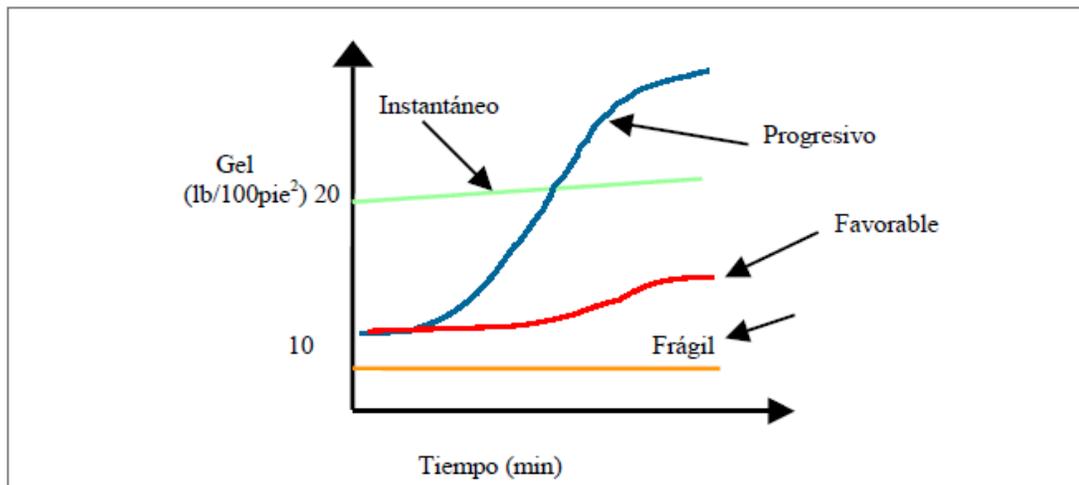


Figura N°2. Tipo de geles (Lummus et al, 1986)

2.3 TENSOACTIVOS Y SURFACTANTES

Los surfactantes son aditivos de gran importancia en materia de fluidos de perforación, debido a las propiedades que ejercen sobre el mismo, son capaces de mantener emulsiones estables y también sólidos dispersos, entre otras funciones. Los surfactantes son ciertamente sustancias anfífilas, lo cual le concede la propiedad de tener una parte polar que posee afinidad por los solventes polares en particular el agua y se denomina comúnmente la parte hidrófila o hidrofílica y el grupo apolar se llama la parte hidrófoba, o bien lipofílica. El hecho de su doble afinidad, la molécula de anfífilo "no se siente bien" en el seno de un solvente, sea este apolar o polar, puesto que existirá siempre una interacción que no será satisfecha. Es por esto que las moléculas de anfífilo muestran una fuerte tendencia a migrar a las interfaces,

de forma tal, que su grupo polar se encuentre dentro del agua y su grupo apolar se encuentre orientado hacia un solvente orgánico o en la superficie de un sólido.

Los ingleses utilizan la palabra "surfactante" (agente activo de superficie) para denotar una sustancia que posee una actividad superficial o interfacial. Es necesario hacer resaltar que todos los anfífilos no poseen tal actividad, para que esto suceda es necesario que la molécula posea propiedades relativamente equilibradas, quiere decir, que no sea ni demasiado hidrófila ni demasiado hidrófoba. La palabra "surfactant" no tiene una traducción exacta en español, lengua en la cual se usa el término genérico de "tensoactivo", que se refiere a una actividad o a una acción sobre la tensión superficial o interfacial, es decir sobre la energía libre de Gibbs. Este término es equivalente a surfactante solo si se supone que la actividad superficial o interfacial se traduce necesariamente por un descenso de la tensión, lo cual es verdad en la mayor parte de los casos que tienen un interés práctico. En general, el término tensoactivo se refiere a una propiedad de la sustancia. Los anfífilos tienen muchas otras propiedades y se les califica según las aplicaciones: jabones, detergentes, dispersantes, emulsionantes, espumantes, bactericida, inhibidores de corrosión, antiestático, etc. o dentro de las estructuras de tipo: membrana, micro emulsión, cristal líquido, liposomas o gel (Salager, 2002).

2.3.1 Clasificación de surfactantes.

Existen diferentes formas de clasificarlos pero por lo general puede clasificarlos de acuerdo a la estructura de su molécula, o más exactamente según la forma de disociación en el agua:

Surfactantes Aniónicos: se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario.

Surfactantes No-iónicos: están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% del total. En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos del tipo alcohol, fenol, éter o amida.

Surfactantes Catiónicos: son aquellos que se disocian en un catión anfífilo y un anión generalmente de tipo halogenado. Estos surfactantes se usan solamente en aplicaciones especiales donde la carga positiva del anfífilo hace que tenga facilidad de adsorción sobre sustratos biológicos o inertes que poseen una carga negativa. Esta última propiedad hace que sean excelentes agentes antiestáticos, hidrofobantes, así como inhibidores de corrosión, y puedan ser utilizados tanto en productos industriales como para uso doméstico. La gran mayoría de estos surfactantes son compuestos nitrogenados del tipo sal de amina grasa o de amonio cuaternario.

2.4 DISPERSIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO

Un sistema disperso consiste en finas partículas insolubles o ligeramente solubles distribuidas a través de un medio continuo, lo cual significa que la fase dispersa y la fase continua pueden ser gases, líquidos o sólidos. Para la investigación, se le llama dispersión a sistema de sólidos o semisólidos dispersos en un medio líquido. También pueden ser llamadas suspensiones (baja concentración de sólidos), o lodos (altas concentraciones de sólidos no-flotantes). Las características de las dispersiones así como su estabilidad, propiedades de flujo, reología, densidad y otras propiedades, dependen de sus componentes: la fase continua o medio, fase sólida o dispersa, dispersantes y otros aditivos. En la dispersión existen fenómenos interfaciales de equilibrio que generan las propiedades deseadas de la dispersión misma (en fluidos de perforación): adsorción del dispersante al sólido, mojabilidad del sólido a la fase continua, fuerzas de atracción entre partículas dispersas, estabilidad de dispersión y otros.

2.4.1 Óleo-Humectantes y dispersantes

Surfactantes de tipo no-iónicos o ligeramente catiónicos que contribuyen con la dispersión de los sólidos incorporados y a la vez permiten mantenerlos humedecidos con aceite. Los productos químicos humectantes en aceite son las poliamidas, las aminas, los fosfatos orgánicos, los hidrocarburos sulfonatados, y otros (CIED, 2002).

Generalmente, los dispersantes se definen como sustancias que promueven la formación de una dispersión y estabiliza la dispersión inhibiendo la agregación de la fase dispersa. Un dispersante debería ser un buen agente humectante para las superficies externas y porosas del polvo a ser dispersado, facilitar el proceso de dispersión ayudando a la reducción de tamaño de partícula y la reducción de la viscosidad de la suspensión durante el mojado, y estabilizar la dispersión formada. Para fluidos de perforación base 100% aceite, la fase dispersa son los sólidos del fluido o también los cortes de perforación, mientras que la fase continua es aceite.

2.4.2 Adsorción de surfactantes

Cuando una molécula de surfactante se ubica en forma orientada en una interfase o una superficie, se dice que se adsorbe en ella. La adsorción es un fenómeno espontáneo impulsado por la disminución de energía libre del surfactante al ubicarse en la interfase y satisfacer parcial o totalmente su doble afinidad. En presencia de una interfase entre un sólido y un líquido, la polaridad relativa del sólido y del líquido puede inducir al surfactante a adsorberse por la parte polar (cabeza) o por la parte apolar (cola) (véase figura N°3). En presencia de un sólido, la adsorción puede también deberse a atracciones de tipo electrostático, y por tanto no está limitada a las sustancias surfactantes.

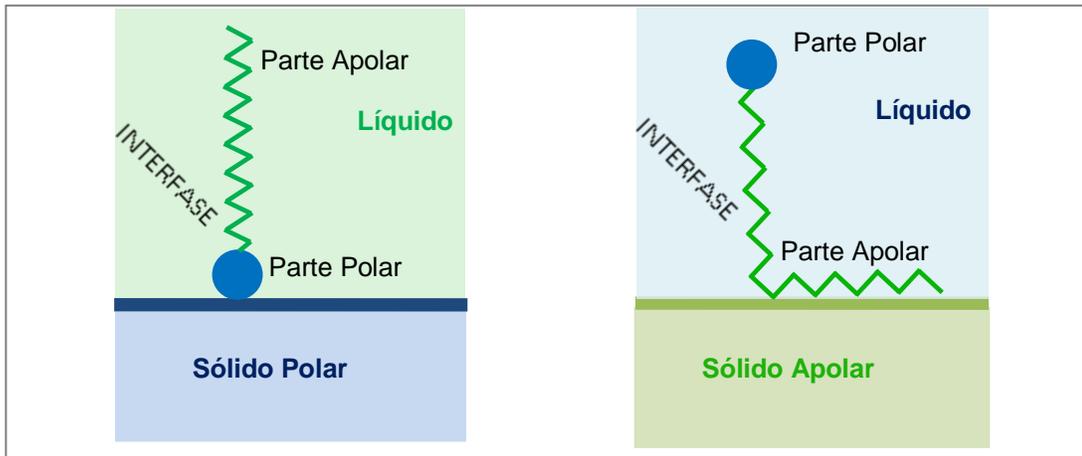


Figura N°3. Adsorción en una interfase Sólido-Líquido (modificado de Salager 2002).

La adsorción es un fenómeno dinámico que está contrarrestado por la desorción. El equilibrio adsorción-desorción se establece entre la interfase y la o las fases líquidas, pero típicamente está muy desplazado hacia la adsorción en la interfase donde el surfactante posee una energía libre menor. En consecuencia se llega muy rápidamente a una saturación de todo el espacio disponible a la interfase, lo que resulta en lo que se llama una monocapa.

2.4.3 Estabilidad de dispersión

La estabilidad de una dispersión se puede definir como la capacidad del sistema en mantenerse disperso en el tiempo o la constancia del número de partículas en un volumen unitario. El número de partículas por unidad de volumen puede cambiar debido a agregación (floculación), sedimentación y/o reacciones químicas. La estabilidad depende del tamaño y peso de las partículas, la distribución de tamaños y la solubilidad de los sólidos en el medio líquido. En las dispersiones inestables la concentración de partículas en la solución disminuye debido a la floculación en el cual actúan principalmente las fuerzas de repulsión, adhesión y cohesión entre las partículas dispersas.

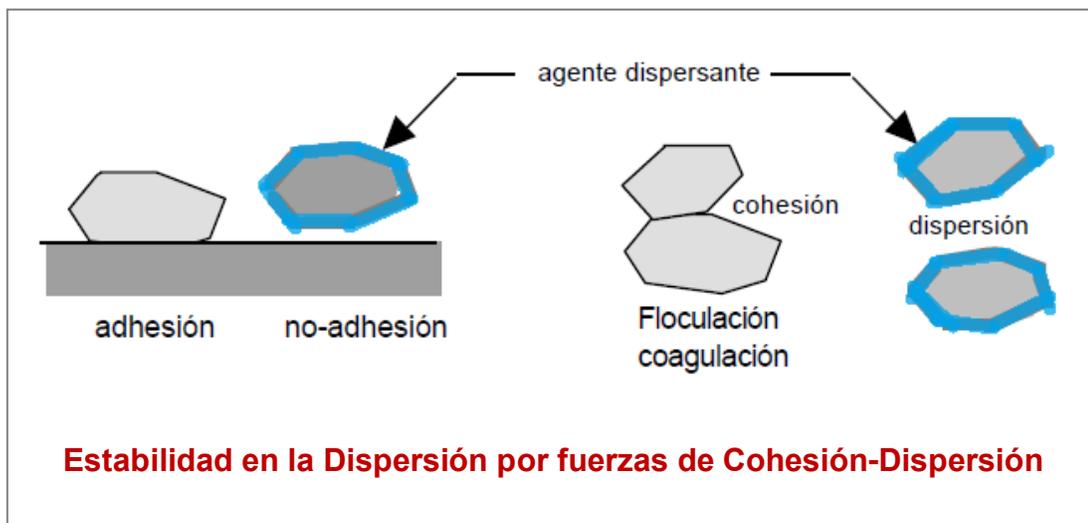


Figura N°4. Estabilidad de dispersión debido a fuerzas de cohesión-dispersión (modificado Salager, 2002).

Debe tomarse en cuenta en las dispersiones que las partículas en dispersión son móviles e inevitablemente colisionan unas con otras debido al movimiento Browniano, un movimiento inducido de la fase líquida, o sedimentación de partículas con diferentes tasas de sedimentación. Los conceptos de cohesión y adhesión son los que determinan las fuerzas atractivas entre partículas, gotas o burbujas dispersadas en una fase continua líquida. Estas fuerzas atractivas tienden a reunir los fragmentos de fase dispersada y por lo tanto tienden a desestabilizar la dispersión. Una de las funciones más importantes de un dispersante es dificultar la aproximación de las partículas a una distancia cercana donde las fuerzas de atracción dominen y estabilizar la dispersión contra la agregación de sólidos. Nótese que la presencia de una capa de surfactante adsorbido en la interfase (véase Figura N°4) puede modificar considerablemente las fuerzas de cohesión o adhesión, puesto que estas actúan a muy corta distancia (del mismo orden de magnitud que el espesor de la capa de material adsorbido). Es en esta propiedad que se fundamenta la acción de los agentes dispersantes, además de la posibilidad de repulsión por parte de las sustancias adsorbidas que modifican las condiciones interfaciales (Salager, 2002).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describen los métodos, técnicas y procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo la investigación y poder cumplir los objetivos del presente Trabajo Especial de Grado.

3.1 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Según Weiss (1985) la investigación evaluativa consiste en “Medir los efectos de un programa por comparación con las metas que se propuso alcanzar, a fin de contribuir con la toma de decisiones consiguientes acerca del programa y para mejorar la programación futura”. En la presente investigación se evalúan diferentes productos óleo-humectantes desarrollados en PDVSA-Intevep para la formulación de fluidos de perforación base aceite, donde se determinará el desempeño de dichos dispersantes y se compara con un dispersante comercial, por tanto se dice que la investigación actual es de tipo evaluativa.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo plantea evaluar dispersantes para determinar su desempeño en fluidos de perforación, cambios en la mojabilidad y estabilidad de la dispersión. Por lo tanto se basa en un diseño de investigación experimental, ya que según Fideas Arias (2006), la investigación experimental “es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente).”

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente sección se describirá brevemente la metodología necesaria para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos planteados, explicando las etapas a lo largo de la investigación. En la figura N°5 se muestra un diagrama de la metodología utilizada para la presente investigación.

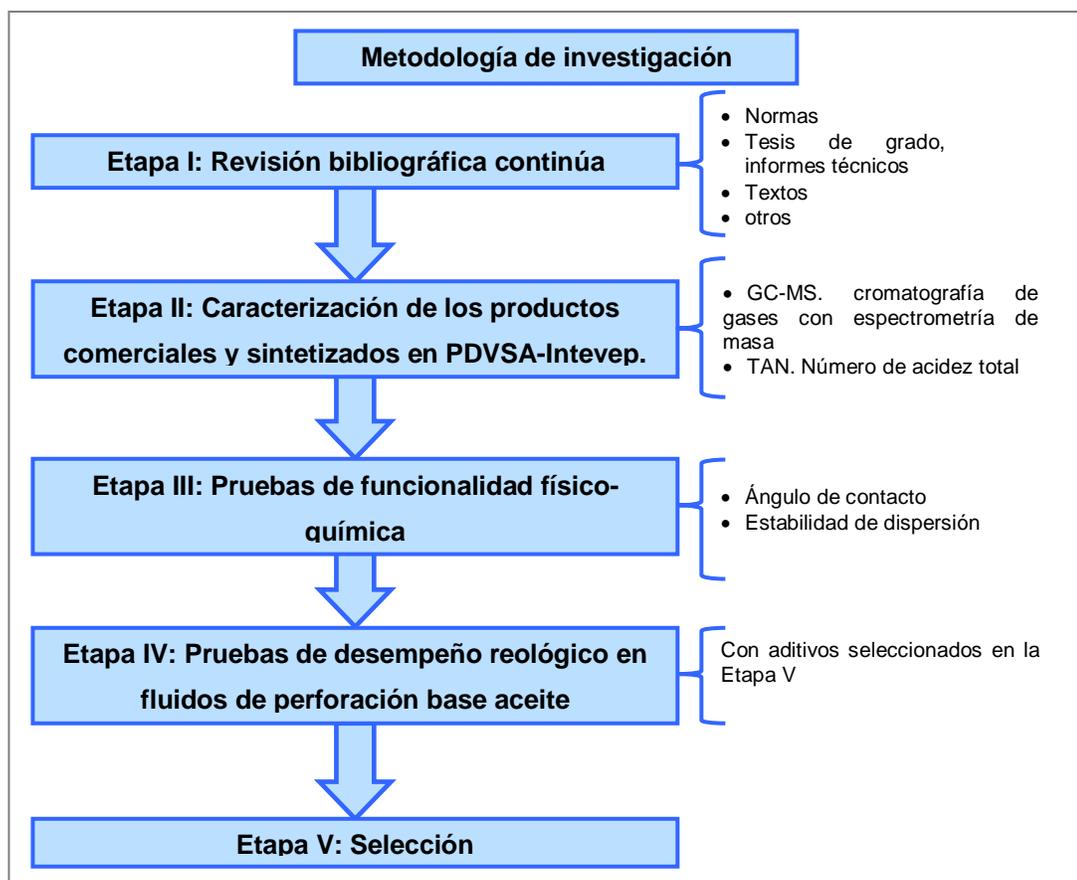


Figura N°5. Diagrama de la metodología de la investigación empleada.

3.3.1 Revisión bibliográfica continua

Se realizó una indagación sobre el estado del arte de la investigación, teorías e hipótesis, conceptos del proceso de perforación de pozos, fluidos de perforación, reología, mojabilidad, surfactantes y dispersantes, dispersiones de sólidos en líquidos, entre otros. Tomando como referencia trabajos de investigación, libros, informes técnicos, manuales de PDVSA, y otros.

Necesarios para afianzar los conocimientos y bases, indispensables para el cumplimiento de los objetivos planteados.

3.3.2 Caracterización de los productos comerciales y sintetizados en Intevep-PDVSA.

Se enviaron muestras de los productos al servicio de química analítica de PDVSA-Intevep, en el cual se realizaron las pruebas de caracterización fisicoquímica, con el objetivo de determinar la composición química y diferencias entre cada muestra, para así poder establecer la influencia de dichas diferencias en las pruebas de funcionalidad fisicoquímica y desempeño de dispersantes en fluidos de perforación 100% aceite.

3.3.3 Pruebas de funcionalidad físico-química

Se determinó el cambio de mojabilidad, con el objetivo de evaluar el efecto del surfactante en la interacción líquido-sólido y la estabilidad de dispersión que refleja la interacción de los sólidos recubiertos por surfactantes comerciales y los sintetizados en PDVSA-Intevep.

3.3.4 Pruebas de desempeño reológico en fluidos de perforación base aceite

En esta etapa se realizaron las pruebas fundamentales de la investigación las cuales si los surfactantes evaluados poseen un rendimiento como dispersante en fluidos de perforación base 100% aceite, evaluando la viscosidad plástica, fuerza de gel y punto cedente antes y después de envejecer y comparándolos con el dispersante comercial.

3.3.5 Selección

Tomando en cuenta el rendimiento de los óleo-humectantes, en el cambio de mojabilidad, dispersión de sólidos y desempeño reológico en fluidos de

perforación, se seleccionaron aquellos óleo-humectantes sintetizados que reflejaron propiedades similares o mejores al aditivo dispersante comercial.

3.4 DEFINICIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

Para el presente Trabajo Especial de Grado se definió como variables, las muestras de dispersantes, los cuales serán sometidos a distintas pruebas y condiciones fijas, para así evidenciar diferencias entre las muestras.

3.4.1 Ángulo de contacto

En un sistema trifásico, se coloca una gota de agua en una superficie de cuarzo, en un medio de aceite mineral con el dispersante. El ángulo formado entre la gota de agua y el sólido que moja, es el ángulo de contacto, tal como se muestra en la figura N°6. El criterio utilizado para afirmar si el dispersante tiene efecto sobre la mojabilidad de la superficie de cuarzo se basa en el ángulo de contacto. Si este ángulo es mayor de 90° indica que la superficie ha sido hidrofobada ($\theta > 90^\circ$); si por el contrario, el ángulo de contacto es menor a 90° ($\theta < 90^\circ$), esto indica que la superficie sigue siendo hidrofílica y por tanto que el óleo-humectante no genera un cambio importante en la mojabilidad de la superficie al aceite.

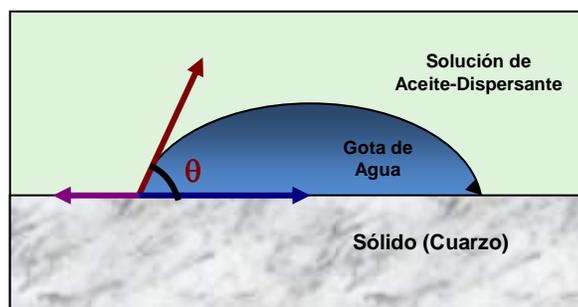


Figura N°6. Ángulo de contacto entre una gota de líquido y un sólido.

3.4.2 Delta de Backscattering 90 minutos (DBS)

El backscattering es la cantidad de luz que se devuelve al chocar contra las partículas sólidas suspendidas en el fluido, como aparece en la figura N°7.

Por lo tanto la intensidad de backscattering depende del tamaño de las partículas y la concentración de sólidos. (Mengual et al, 1999).

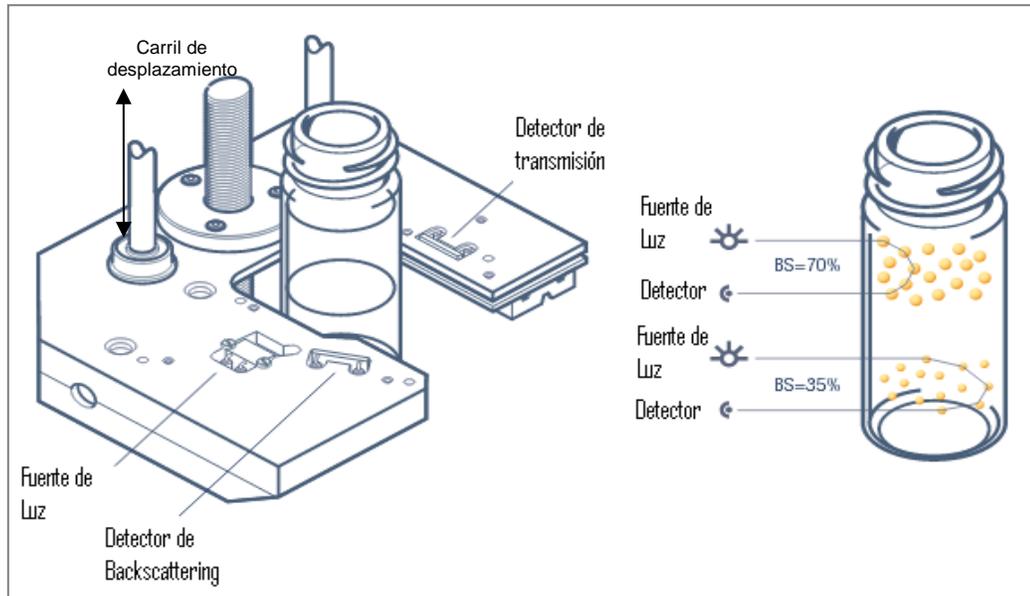


Figura N°7. Esquema de transmisión y backscattering en Turbiscan LAB (modificado Formulation, s.f.).

Entonces el Delta de Backscattering se basa en la diferencia entre el valor de backscattering al inicio de la prueba y a los 90 minutos en reposo tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$DBS = BS(90min) - BS(0min) \quad (3)$$

Dónde:

DBS: Delta backscattering, %.

BS: Backscattering, %.

Se obtiene el valor promedio de DBS tomado en cuenta las dos regiones a evaluar en el cual se espera que existan variaciones en la estabilidad de dispersión.

- Región A, 2-10mm: representa el fondo de la celda donde se espera la sedimentación de sólidos.

- Región B, 40-50mm: representa el tope de la celda donde se espera fenómenos de agregación de partículas y separación de fases.

3.4.3 Reología antes y después de envejecer

En relación a las pruebas de desempeño reológico, se definen como indicadores dos parámetros del modelo reológico de plástico de Bingham y el indicador de tixotropía del fluido en la formación de geles:

- La viscosidad plástica, VP (ver ecuación 1).
- Punto cedente, PC (ver ecuación 2).
- Fuerza de gel a 10 segundos y a 10 minutos.

3.5 MUESTRAS A EVALUAR

Para el presente trabajo de investigación se evaluaron un total de 8 aditivos dispersantes, entre ellos 1 aditivo comercial importado, 4 sintetizados con materia prima nacional, 1 materia prima importada, 2 sintetizados a partir de compuestos puros (100% de ácidos grasos saturados, 100% de ácidos grasos insaturados). En la tabla N°1 se presenta la notación de las muestras de óleo-humectantes a evaluar.

Tabla N°1. Muestras de dispersantes a evaluar.

Cantidad	Descripción	Notación
1	Aditivo comercial importado (referencia)	H1
4	Aditivos sintetizados con materia prima nacional	A1, A2, A3, A4.
1	Aditivo sintetizado con materia prima importada	A5
2	Aditivos sintetizados a partir de compuestos puros	A6 (100% AG saturado) A7 (100% AG insaturados)

3.6 TÉCNICAS, PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS, PREPARACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la ejecución de las pruebas de desempeño se requieren una serie de procedimientos y equipos para preparar las muestras y los fluidos a evaluar, a continuación se muestra los esquemas de cada procedimiento para cada prueba a realizada.

3.6.1 Ángulo de contacto

Para la medición del cambio de mojabilidad por ángulo de contacto empleando la técnica de la gota posada es el descrito en el esquema de la figura N°8.

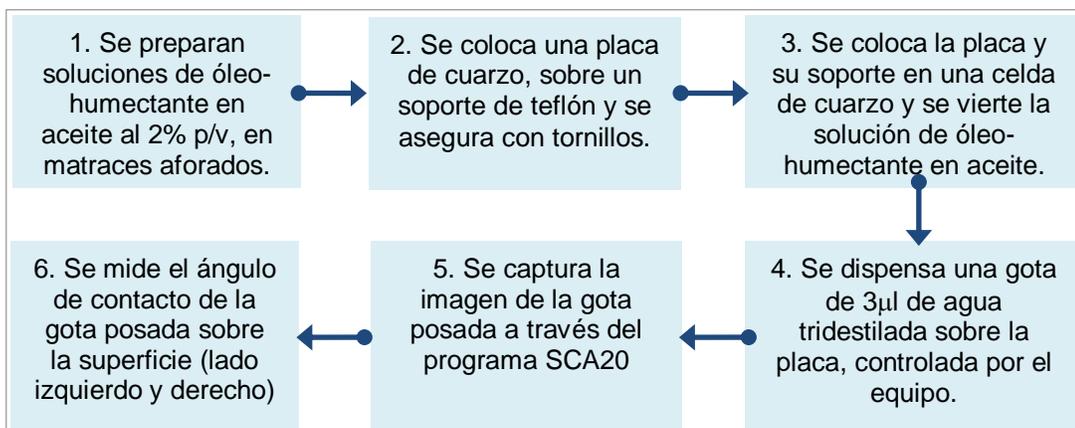


Figura N°8. Procedimiento de medición del ángulo de contacto de la gota posada.

El equipo empleado para la medición del ángulo de contacto fue el Contact Angle System OCA20 (ver figura N°9).

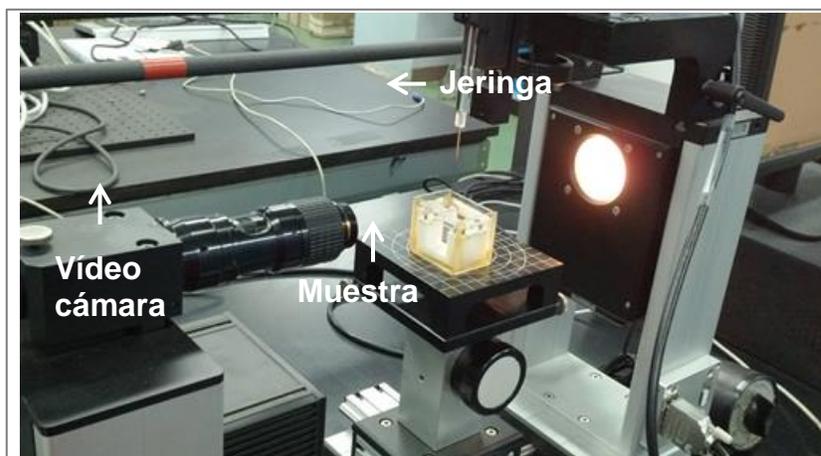


Figura N°9. Equipo de medición de ángulo de contacto OCA20

3.6.2 Estabilidad de Dispersión

La prueba de estabilidad de dispersión requiere la preparación del fluido modelo cuya composición se encuentra definida en la tabla N°2.

Tabla N°2. Formulación del fluido modelo para la prueba de estabilidad de dispersión.

Aditivo	Concentración, Lpb.	Cantidad
Aceite mineral	--	29,2 ml
Óleo-humectante	6	0,5140g
Cal	6	0,5140g
Arcilla Organofílica	6	0,5140g
Carbonato de calcio	6	0,5140g

Tomando en cuenta las cantidades de sólidos a agregar para formular el fluido base, se realiza la prueba según el procedimiento en la figura N°10.

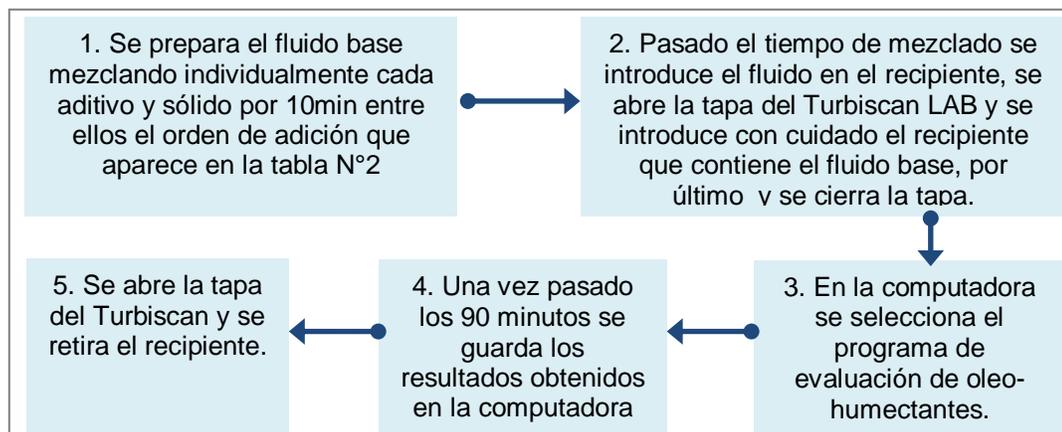


Figura N°10. Procedimiento de medición de backscattering para la evaluación de la estabilidad de dispersión.

El equipo empleado en la medición del backscattering para la determinación de la estabilidad de Dispersión, es el Turbiscan Lab de Formulacion presentado en la figura N°11.



Figura N°11. Equipo de medición de Bakscattering Turbiscan Lab.

3.6.3 Desempeño reológico de fluidos de perforación

Para evaluar el desempeño como aditivo oleo-humectante en fluidos de perforación y su efecto sobre las propiedades del mismo se utiliza una formulación 100% aceite con una densidad de 11,5 Lpg, con el fin de minimizar la cantidad de óleo-humectante que es limitado, se formula medio barril equivalente de laboratorio (1 barril equivalente=270 ml, y 1Lpb=1g) por triplicado, empleando para ello la formulación presentada en la tabla N°3.

Tabla N°3. Formulación base de fluido de perforación densificado a 11,5 Lpg.

N°	Aditivo	Conc. (Lpb)	Cantidad	Función	Empresa
-	Aceite mineral	--	135ml	Fase continua	VASSA
1	Oleo-humectante	2	1g	Humectante	Varios
2	Arcilla Organofílica	12	6g	Viscosificante	BAKER
3	Glicerina	3	1,5g	Activador polar	BARACTIVE
4	Cal	2	1g	Alcalinizante	PROAMSA
5	Lignito Organofílico	12	6g	Control de filtrado	HALLIBURTON
6	Barita	283	141.5g	Densificante	HALLIBURTON

La prueba de reología del fluido de perforación base aceite constará de cuatro secciones, las cuales son presentadas en la figura N°12.

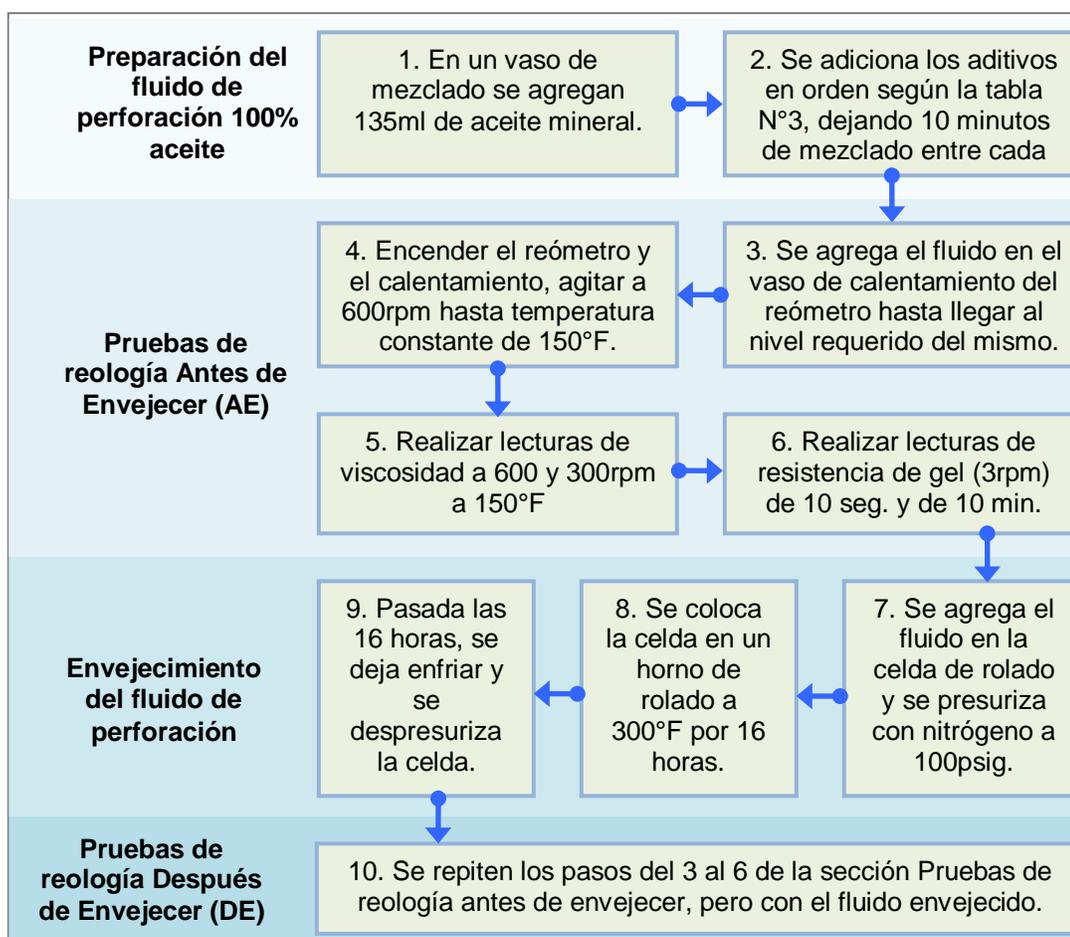


Figura N°12. Procedimiento prueba de reología, a fluidos de perforación base aceite antes y después de envejecer.

Para la preparación de fluidos de perforación se emplea un mezclador Hamilton Beach que dispersa los sólidos y aditivos requeridos (figura N°13).



Figura N°13. Mezclador Hamilton Beach Commercial.

Se emplea una balanza Mettler PM6100 para medir las cantidades requeridas de producto a agregar en el fluido de perforación como se muestra en la figura N°14, con una resolución de $\pm 0,01$ g.



Figura N°14. Balanza electrónica Mettler PM6100.

Para la medición de propiedades reológicas de los fluidos de perforación se emplea un viscosímetro rotacional de lectura directa OFITE modelo 800

(figura N°15). Capaz de medir desde 3 rpm a 600rpm, con una resolución de $\pm 1 \text{ lb}/100\text{pie}^2$.

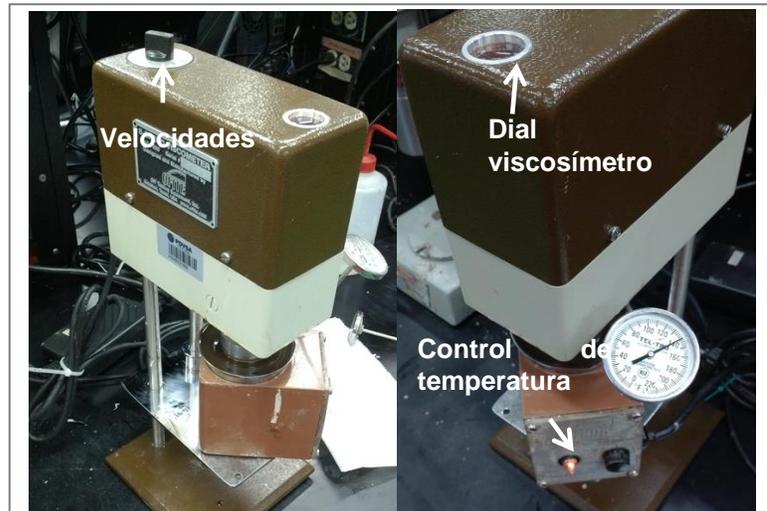


Figura N°15. Viscosímetro rotacional OFITE modelo 800.

Para el envejecido de los fluidos de perforación se emplea un horno de rolado el cual mantiene el fluido en constante movimiento en las celdas de rolado presurizadas y con un control de temperatura como se muestra en la figura N°16.

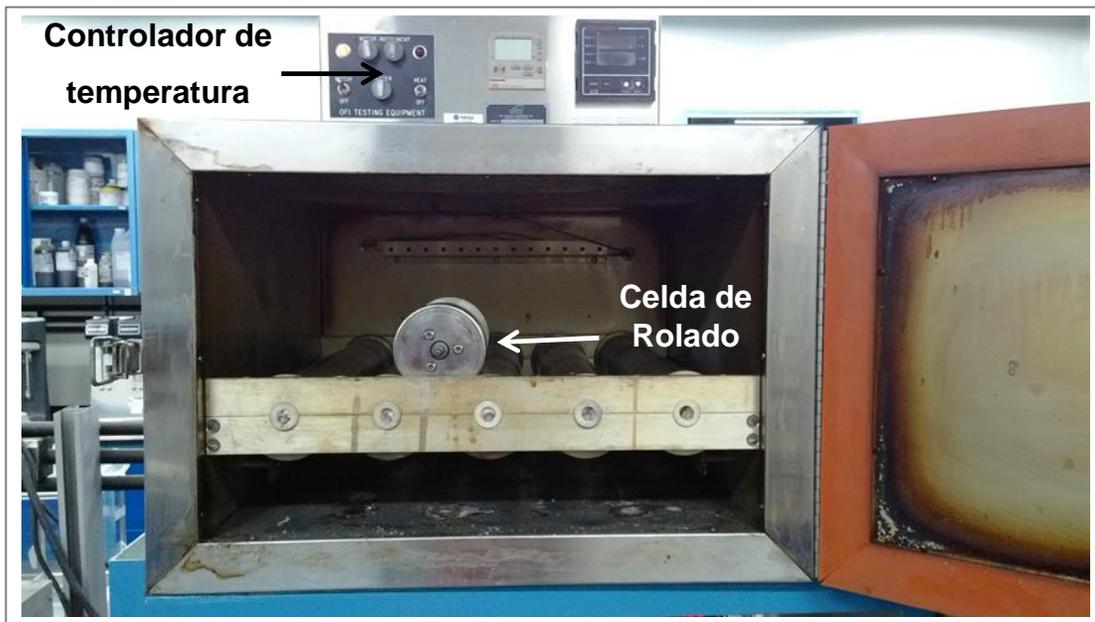


Figura N°16. Celda de rolado OFITE.

3.7 ANÁLISIS DE DATOS

Las pruebas de caracterización vienen con un error asociado a las normas internacionales, y son pruebas certificadas en PDVSA-Intevep mediante la gerencia de química analítica (SQTA). A continuación en la tabla N°4 se presenta las pruebas a realizar para la caracterización de las muestras de dispersantes.

Tabla N°4. Técnicas empleadas para la caracterización de las muestras de dispersantes

Técnica	Base teórica	Resultado a obtener
Cromatografía de gases con espectrometría de masa (GC-MS)	La muestra se volatiliza y se inyecta en una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil de un gas inerte, y debido a la diferencia de volatilidades de los compuestos, hace que estos se separen en la columna. Acoplado con un espectrómetro de masa, es posible especificar los compuestos en la muestra de debido a su peso molecular, en conjunto con el índice de retención (Skoog, Holler, Nieman, 2000).	Proporción de compuestos saturados e insaturados en La materia prima
Número de acidez total (TAN)	Consiste en la titulación potenciométrica de una muestra de producto, disolviéndola en una solución de alcohol agua y tolueno, y se titula con una solución alcohólica de 0,1mol/L de hidróxido de sodio (KOH), agregando pequeñas porciones de la solución y esperando que se establezca un potencial constante. Se hace un barrido de volumen de titulante, para obtener una curva con inflexiones las cuales representan puntos de equivalencia. Los valores de números de acidez se representan como miligramos de hidróxido de potasio sobre gramos de muestra. (ASTM, 2011).	Número de acidez total en mg KOH /g muestra

Para las pruebas de desempeño fisicoquímico (ángulo de contacto, estabilidad de dispersión) se realizarán las pruebas por triplicado para verificar la reproducibilidad de los sistemas estudiados. Los criterios considerados para las selecciones de los dispersantes con mejor desempeño y funcionalidad vienen reflejados en la tabla N°5.

Tabla N°5. Análisis y criterios a utilizar para los datos de pruebas de desempeño.

Técnica	Criterio		
Ángulo de contacto	<p>Criterio 1: Si este ángulo es mayor de 90° indica que la superficie ha sido hidrofobada ($\theta > 90^\circ$); si por el contrario, el ángulo de contacto es menor a 90° ($\theta < 90^\circ$), esto indicara que la superficie sigue siendo hidrofílica y por tanto que el óleo-humectante no genero un cambio importante en la mojabilidad de la superficie al aceite.</p>		
Estabilidad de Dispersión	<p>Criterio 2: Región A (2-10mm): si se determina un DBS promedio mayor a 1,00% se dice que hubo sedimentación de sólidos en el sistema.</p>		
	<p>Criterio 3: Región B (40-50mm): si se determina un DBS mayor a $\pm 0,2\%$ se dice que hubo floculación y/o coagulación en el sistema.</p>		
Pruebas de desempeño en fluidos de perforación base aceite (11,5 Lpg)	Medida	Antes de envejecer	Después de envejecer
	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidad aparente, VP • Punto cedente, PC • Fuerza de gel 10s-10min, 	Propiedades reológicas iguales o cercanas a las observadas con el aditivo comercial de referencia usado. Variación de +/- 25%.	Mantener propiedades reológicas constantes o con poca variabilidad, antes y después de envejecer. (+/- 25%)

Los aditivos serán evaluados según puntajes obtenidos (base 20 puntos) en el cual de 0-15 puntos son deficientes y de 16-20 puntos son aditivos seleccionados.

3.8 LIMITACIONES

En la metodología de la investigación presentada, se concibe fijar sistemas y estudiar como variables los diferentes surfactantes sintetizados y comerciales, en el cual el efecto de la concentración de surfactante no será objeto de estudio debido a la poca disponibilidad de producto sintetizado. Además se decide fijar las concentraciones de surfactante para 2 y 6 Lpb debido a que estas concentraciones son recomendadas y altamente utilizadas por el Laboratorio de Fluidos Perforación en PDVSA-Intevep (densificados a 11,5 Lpg).

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos, así como sus respectivos análisis e interpretaciones, que permitieron alcanzar los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado, destinado a la evaluación a escala de laboratorio de aditivos óleo-humectantes utilizados como dispersantes en fluidos de perforación base aceite.

4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS SURFACTANTES EVALUADOS

4.1.1 Número de acidez total

A los productos sintetizados en PDVSA-Intevep y al aditivo de referencia se le realizaron pruebas para determinar su acidez total, cuyos valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N°6. Valores de número de acidez total de los productos

Producto	Número de acidez total, mgKOH/g muestra
A1	122
A2	>150
A3	>150
A4	>150
A5	140
A6	>150
A7	>150
H1	14

Según la tabla N°6 se puede observar que los surfactantes sintetizados superan 10 veces en orden de magnitud la acidez del aditivo de referencia H1.

En las especificaciones del producto por Baker Hughes Incorporated (s.f.) dice que Carbomul-HT es un agente humectante, emulsificante y dispersante de altas temperaturas de tipo no-iónico y ligeramente catiónico. Siendo este aditivo una mezcla de poliamidas y esteres era de esperarse un número ácido bajo, en cambio los productos sintetizados es una mezcla de ácidos carboxílicos, poliamidas y esteres en baja proporción, por esta razón los ácidos presentes aumentan el número de acidez de los productos sintetizados registrados en la tabla N°6.

Se recomienda determinar balance hidrofílico lipofílico, que ayude a determinar en general la fuerza de la parte polar y apolar del surfactante.

4.1.2 Proporción de saturados e insaturados

En la siguiente figura se presentara los valores de la proporción de cadenas insaturadas y saturadas en los aditivos sintetizados en PDVSA-Intevp.

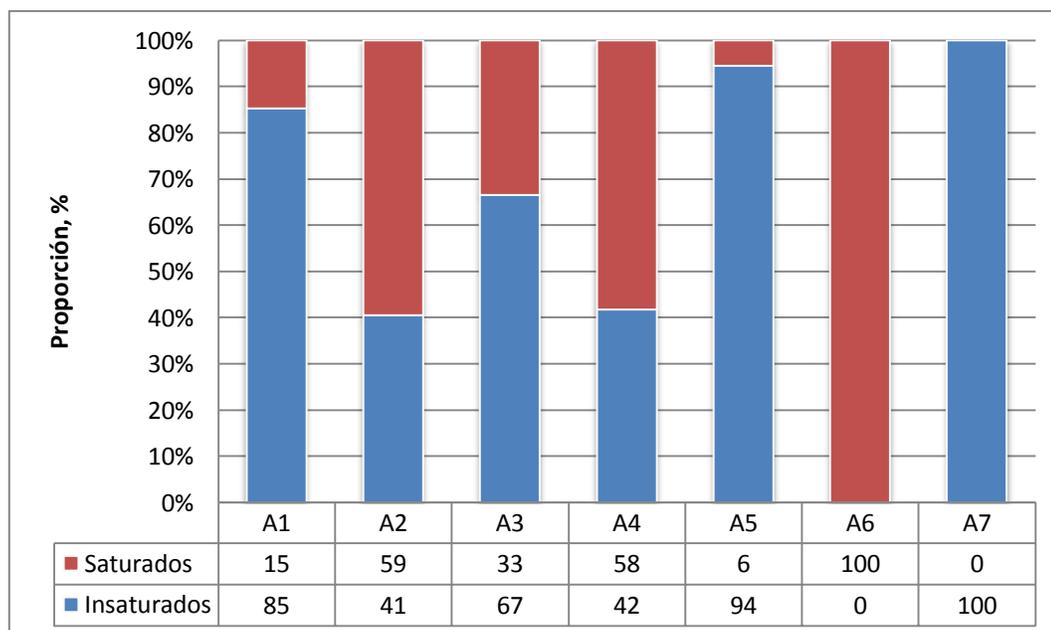


Figura N°17. Proporción de cadenas insaturadas y saturadas de los aditivos sintetizados.

En la figura N°17 se pueden observar los valores de la proporción entre ácidos grasos insaturados y saturados de los productos sintetizados. La presencia de insaturación en la parte lipofílica del surfactante determina la consistencia que adquiere dicho surfactante. Los aditivos con mayor proporción de insaturados como el A7 y el A5 son líquidos viscosos debido a que la parte lipofílica no permite el ordenamiento de los surfactantes debido al efecto estérico de la cola insaturada. El aditivo A6 en cambio posee un 100% de cadenas saturadas y su producto es un sólido quebradizo. Sin embargo, los productos que poseen una proporción intermedia de saturados e insaturados se muestran como geles, debido al ordenamiento molecular de las cadenas saturadas y el efecto estérico de las cadenas insaturadas como es observado en los aditivos A1, A2, A3 y A4.

4.2 CAMBIO DE MOJABILIDAD

A continuación se presenta en la siguiente tabla, los valores de ángulo de contacto izquierdo y derecho promedio de las gotas de agua posadas en una superficie de cuarzo inmersa en una solución aceite y los distintos surfactantes sintetizados, el producto de referencia H1 y el blanco (aceite mineral sin surfactante).

Tabla N°7. Valores de ángulo de contacto de óleo-humectantes evaluados y el blanco

MUESTRA	MEDICIONES ÁNGULO DE CONTACTO, °.	
	Izquierdo	Derecho
BLANCO	40,6	41,1
H1	140,2	140,4
A1	78,9	75,6
A2	74,8	72,0
A3	68,7	66,9
A4	95,9	96,1
A5	63,3	64,5
A6	71,0	70,1
A7	63,9	62,9

En la tabla N°7 se puede observar que inicialmente las gotas de agua aplicadas en la superficie de cuarzo en aceite sin surfactante (BLANCO) posee un ángulo interno izquierdo y derecho promedio de $40,6^\circ$ y $41,1^\circ$ respectivamente, lo cual es un valor esperado ya que la superficie de cuarzo no ha sido alterada y su afinidad al agua es mayor que del aceite mineral. En la figura N°18 se pueden observar gráficamente las gotas de agua sobre la superficie de cuarzo sin surfactante, como es evidente la forma de la gota tiende a cubrir la mayor superficie posible del cuarzo para minimizar la energía libre del sistema. Por esta razón se dice que la superficie de cuarzo es mojada por la gota de agua.

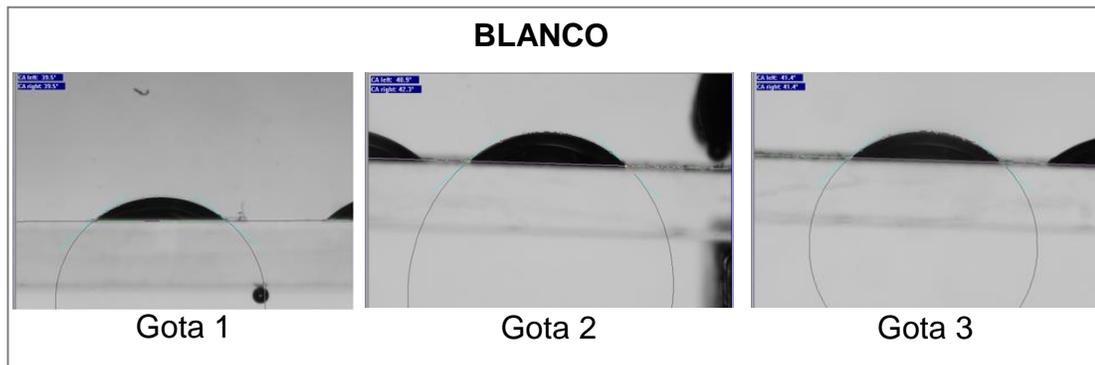


Figura N°18. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en aceite sin surfactante.

Por otro lado, se observan valores de ángulo de contacto mayores para aquellas gotas posadas en la superficie de cuarzo inmersa en la solución de aceite mineral y surfactante. La superficie ha sido alterada debido a la adsorción del surfactante a la superficie del sólido, cambiando la afinidad de la misma de ser polar a no polar. Este comportamiento se debe a la adsorción de la parte polar del surfactante a la superficie polar de la lámina de cuarzo, dejando la parte apolar expuesta, lo que genera una superficie hidrofóbica poco polar o apolar.

El aditivo comercial H1, utilizado como aditivo dispersante de referencia, cambia la afinidad de la superficie del agua al aceite, describiendo ángulos de contacto de $140,2^\circ$ y $140,0^\circ$ (promedio del ángulo izquierdo y derecho respectivamente). El aditivo comercial Carbomul-HT (H1) se definió

anteriormente como una mezcla de surfactantes no-iónicos y ligeramente catiónicos con amidas reaccionadas y activadas (Baker, 1998), se observa un fuerte cambio de la afinidad de la superficie debido a que la superficie de cuarzo está cargada negativamente. Se puede inferir que la adsorción es más eficaz con los surfactantes catiónicos presentes en el aditivo Carbomul-HT. Se observa entonces en la figura N°19 la forma casi esférica adquirida por las gotas de agua posadas en la lámina de cuarzo alterada por el aditivo H1.

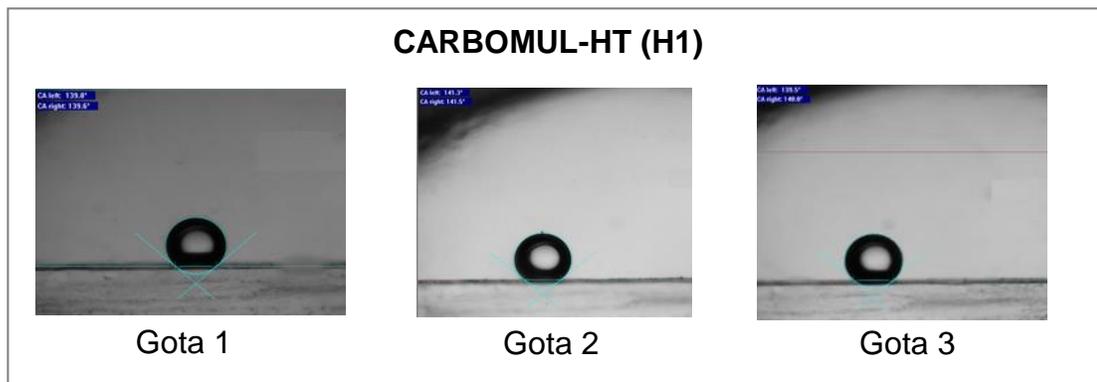


Figura N°19. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en solución aceite con H1.

De los surfactantes sintetizados tan solo el aditivo A4, pudo superar el criterio de mojabilidad propuesto, al generar gotas de agua con un promedio de ángulos de contacto internos de 95,9° y 96,1° izquierdo y derecho respectivamente, ligeramente mayores a 90° por lo cual se dice que cambio la afinidad de la superficie de cuarzo a ser hidrófoba. Siendo 90° un ángulo que dice que las tensiones interfaciales son iguales según la ecuación de Young (Gea, 2006), se puede decir que la acción del surfactante A4 sobre la superficie equilibra las tensiones interfaciales del agua y del aceite a la superficie del sólido son también similares y ligeramente hidrófobas. En la figura N°20 se puede observar la forma de las gotas de agua en la superficie del sólido con mojabilidad alterada por acción del surfactante A4.

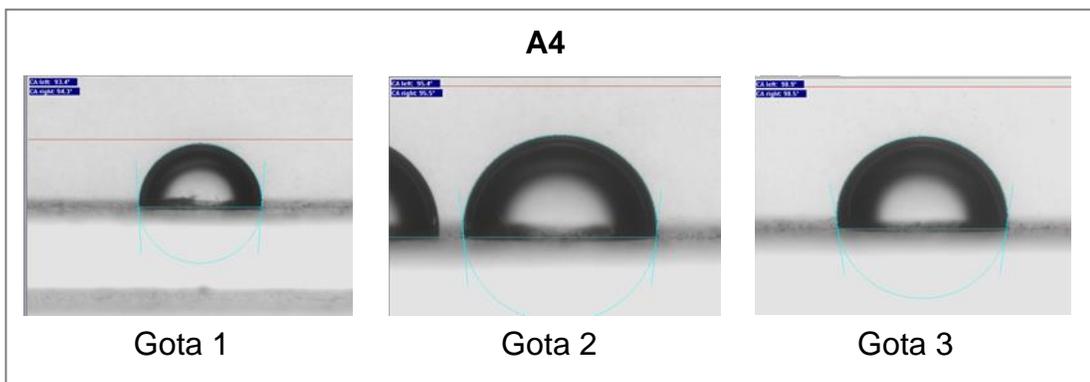


Figura N°20. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en solución aceite con A4.

Los surfactantes sintetizados A1, A2, A3, A5, A6 y A7 no superaron el criterio de mojabilidad, teniendo todos ángulos de contacto interno menores a 90° , se puede decir que la acción del surfactante en el cambio de mojabilidad de la lámina de cuarzo no es tan eficiente como el aditivo de referencia Carbomul-HT.

Aunque los surfactantes sintetizados A1, A2, A3, A5, A6 y A7 no cambiaron radicalmente la mojabilidad de la superficie de cuarzo como el aditivo de referencia H1, se puede apreciar aun un cambio de mojabilidad al aceite con respecto al estado inicial. Con un cambio mínimo de al menos de 20° significa que se alteró levemente la mojabilidad de la superficie a ser más lipofílica.

En la figura N°21 se observa las imágenes obtenidas para las gotas medidas en el sistema aceite/agua/cuarzo por triplicado. Se puede observar que las formas de las gotas son semielípticas. Las gotas de agua poseen ángulos menores a 90° para los sistemas con productos A1, A2, A3, A5, A6 y A7.

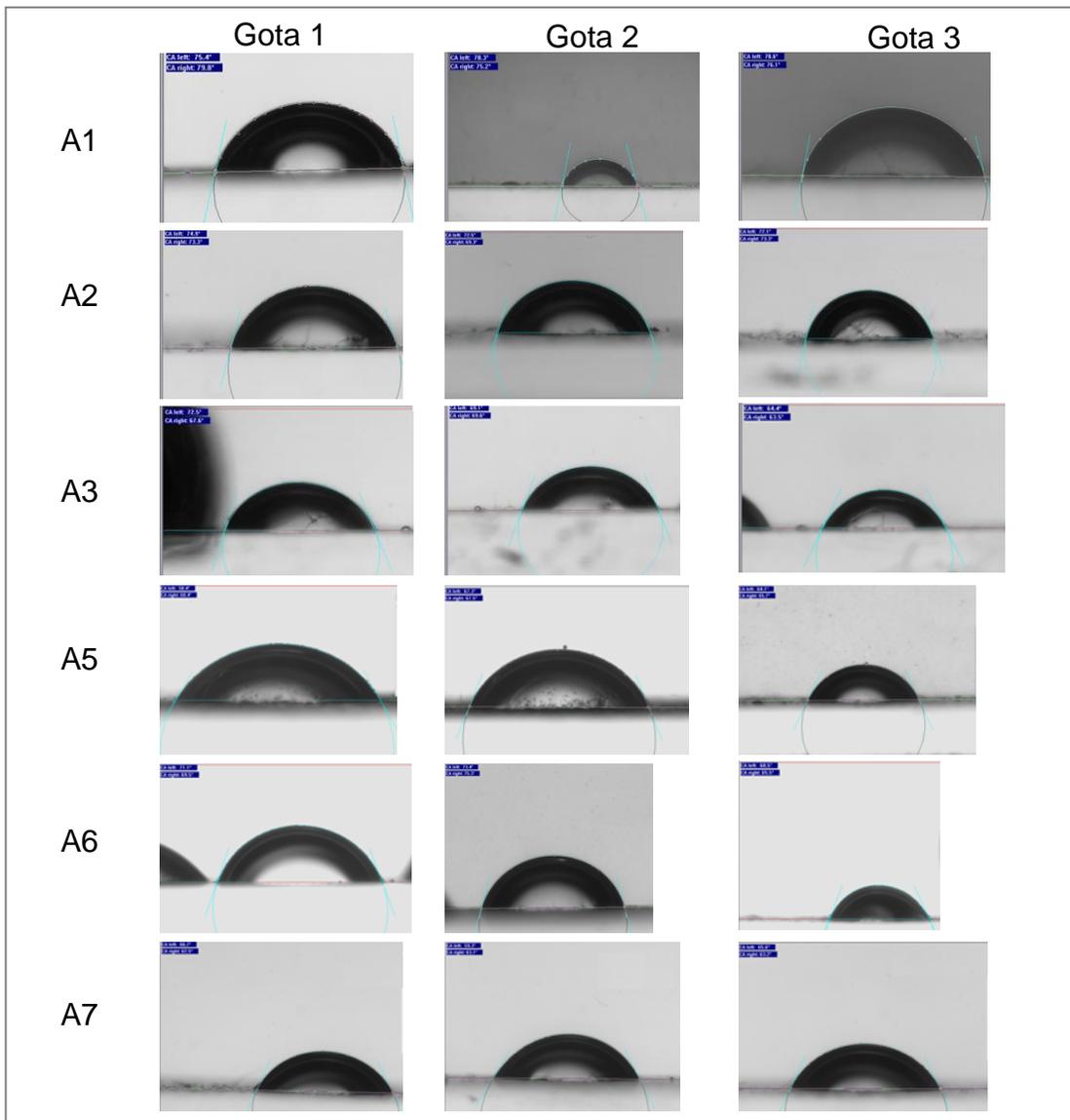


Figura N°21. Gotas de agua sobre una superficie de cuarzo en soluciones de aceite-dispersante con ángulos de contacto menores a 90° .

Los motivos por los cuales se obtienen bajos cambios de mojabilidad por la acción de un surfactante son varias. El efecto de cambio de mojabilidad depende directamente de la adsorción del surfactante en la superficie del sólido. Se obtuvo un cambio importante con el aditivo comercial debido a la naturaleza de la parte polar de los surfactantes, el cual se dijo antes que era una mezcla de no-iónicos y catiónicos, sabiendo además la carga negativa de la superficie mineral de cuarzo, se dice que la adsorción es eficiente para

dicho aditivo. Mientras que los surfactantes sintetizados como se estableció anteriormente, son de tipo no-iónico, y este tipo de surfactante son de grupos que generan débiles fuerzas de Van der Waals, resultando en menor adsorción entre el dispersante y la superficie.

La adsorción es un fenómeno dinámico que está contrarrestado por la desorción. El equilibrio adsorción-desorción se establece entre la interfase y la o las fases líquidas, pero típicamente está muy desplazado hacia la adsorción en la interfase donde el surfactante posee una energía libre menor (Salager, 2002). Si el surfactante posee una cabeza poco polar, como lo son los de tipo no-iónico, puede ocurrir que el surfactante no se adhiera uniformemente a la superficie del sólido, afectando la mojabilidad en la superficie.

4.3 DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD DE DISPERSIÓN

4.3.1 Estabilidad de dispersión de sólidos por los óleo-humectantes

A continuación se presentan resultados obtenidos para el estudio de la estabilidad de dispersión de sólidos por acción de los surfactantes sintetizados en PDVSA-Intevep.

En la figura N°22 se pueden observar las curvas de backscattering para cada minuto de la prueba en reposo, en la inestabilidad en la dispersión de sólidos de la formulación sin surfactante. Según las curvas mostradas se presentan una rápida precipitación de sólidos, fenómenos de coagulación y la separación de fases en el tope de la celda.

Sin la acción de un óleo-humectante o dispersante, los sólidos tienden a precipitar por efecto de la gravedad, además ocurre una agregación de sólidos que aumentan su tamaño con el tiempo, lo que acelera el fenómeno de precipitación. La coagulación ocurre principalmente por la atracción electrostática de la arcilla organofílica que posee superficies cargadas negativa y positivamente, lo cual hace que se agrupen y tiendan a formar

flóculos de gran tamaño que precipitan al fondo del recipiente. En este fenómeno lo siguen además en menor fuerza, el carbonato de calcio y la cal hidratada que poseen superficies activas.

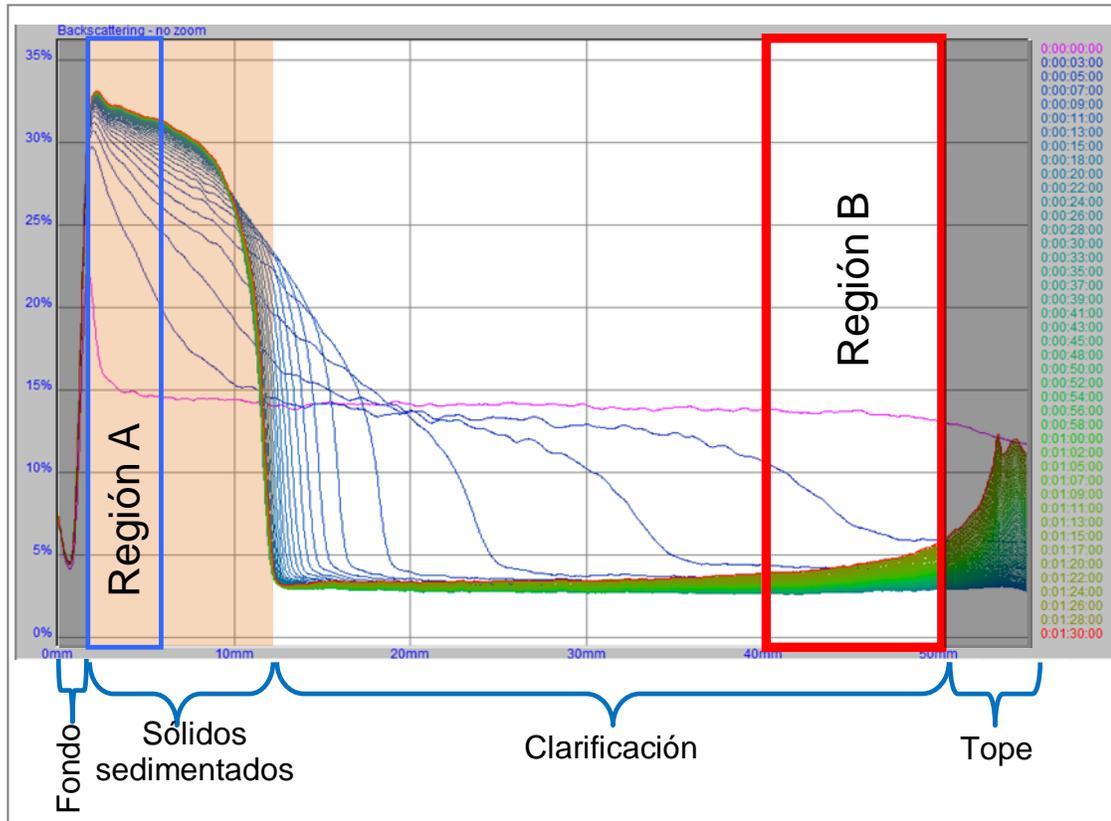


Figura N°22. Backscattering 90 minutos para una formulación base sin surfactante

La figura N°23 presenta la celda del Turbiscan con la dispersión sin surfactante luego de 90 minutos de reposo. Se pueden observar 2 o 3 fases (en orden ascendente en la celda: sólidos sedimentados, dispersión de sólidos de menor tamaño y la fase clarificada) definidas separadas, en el fondo los sólidos de gran tamaño que decantan rápidamente, luego en intermedio una dispersión con partículas de menor tamaño que se encuentran dispersas aun y luego una fase clarificada, donde solo está presente el aceite sin sólidos dispersos. Las longitudes de la celda donde se observa cada fase corresponden a las zonas presentadas en la figura N°22, donde la sedimentación posee los valores de Backscattering mas altos, la fase dispersa un valor intermedio y la fase aceite con los valores más bajos

debido a que el haz de luz infrarroja pasa a través de la celda sin colisionar con las partículas sólidas.

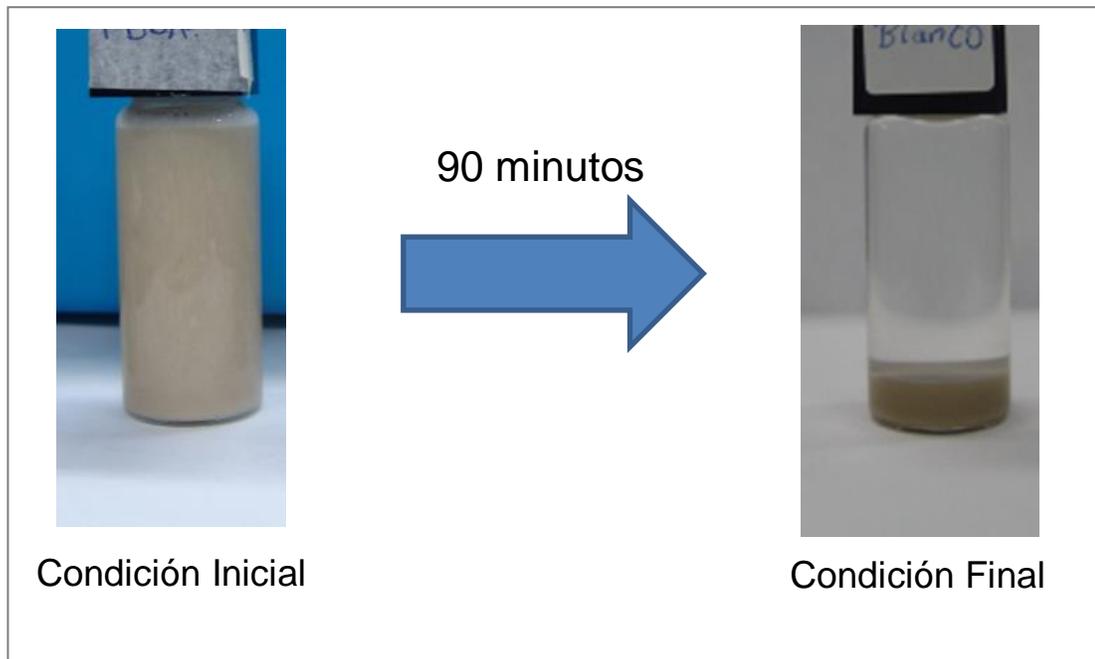


Figura N°23. Dispersión de sólidos sin surfactante antes y después de yacer estática por 90 minutos

A continuación se presentan los valores de Delta Backscattering (DBS) para las regiones A y B.

Tabla N°8. Valores de DBS para las regiones A y B de la dispersión sin surfactante

	DBS-A, 2-5 mm	DBS-B, 40-50mm
Blanco	16,70	-9,07

Los valores de Delta Backscattering (DBS) en las regiones A y B son promedios de los valores en las curvas para las longitudes correspondientes, el delta se calcula como la diferencia entre el valor final del promedio de backscattering de la región a los 90 minutos y el valor de backscattering al “minuto cero” cuando el fluido está disperso de manera homogénea. En la tabla N°8, se pueden observar altos valores de backscattering para ambas regiones, debido a la diferencia entre la condición inicial y final de la

Dispersión en 90 minutos. En la región A el valor alto se debe a la gran cantidad de sólidos que sedimentaron. Su valor positivo indica un aumento de la dispersión del haz de luz infrarroja que implica una mayor cantidad de sólidos, en relación a la condición inicial, que rebotan la luz hacia el detector de backscattering a 45° de la emisión de infrarrojos. La magnitud del valor de DBS en la región B, indica el cambio de una fase dispersa a una fase líquida sin sólidos dispersos, el signo negativo de dicho valor indica una disminución de concentración de sólidos al final de los 90 minutos, que se debe a la sedimentación de los mismos al fondo del recipiente, dejando el tope con menor cantidad de sólidos, lo que permite que el haz de luz pueda pasar a través de la celda con facilidad.

En la siguiente figura se presentan los valores de DBS para la dispersión de sólidos con el surfactante sintetizado A4 (seleccionado al azar de entre los surfactantes sintetizados) para las regiones A y B, a distintas concentraciones del óleo-humectante.

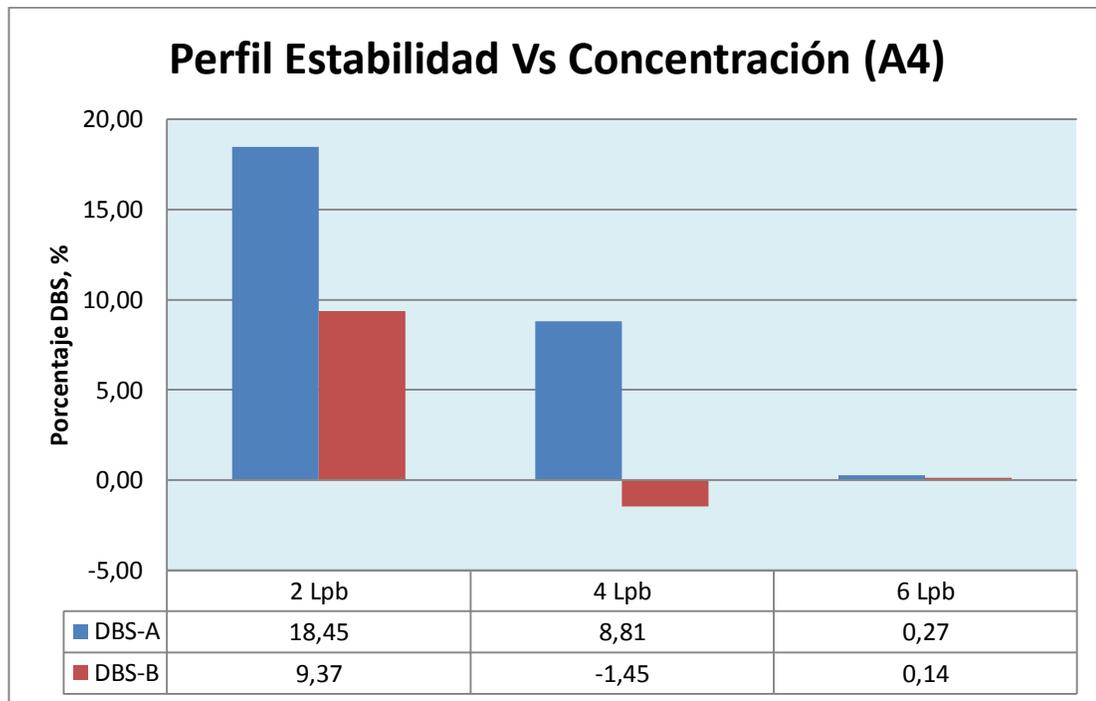


Figura N°24. Porcentaje de DBS para dispersiones a distintas concentraciones de dispersante A4

En la figura N°24 se puede notar que a mayor concentración de dispersante menor es la diferencia de retrodispersión a los 90 minutos de la prueba, es decir, mayor estabilidad de dispersión sólidos debido a mayor cantidad de surfactante. Los valores bajos de DBS indican que la dispersión de sólidos se mantuvo sin cambio luego de 90 minutos de reposo. Los sólidos en dispersión no se encuentran estáticos, el valor bajo de DBS indica que las partículas interactúan entre sí, agregándose y formando flóculos de tamaños variados (algunos tan grande que pueden sedimentar) y otros pequeños flóculos que chocan con otros y se mantienen dispersos. La fuerza de estos choques entre las partículas es mayor que la fuerza de gravedad que hace que sedimenten, por esta razón los sólidos se mantienen dispersos. Las fuerzas de choque son las fuerzas de atracción y repulsión electrostáticas de las superficies, las cuales son controladas debido a la presencia del surfactante, que crea un efecto estérico en las partículas evitando así que se aproximen demasiado para crear flóculos de gran tamaño que sedimenten al fondo de la celda.

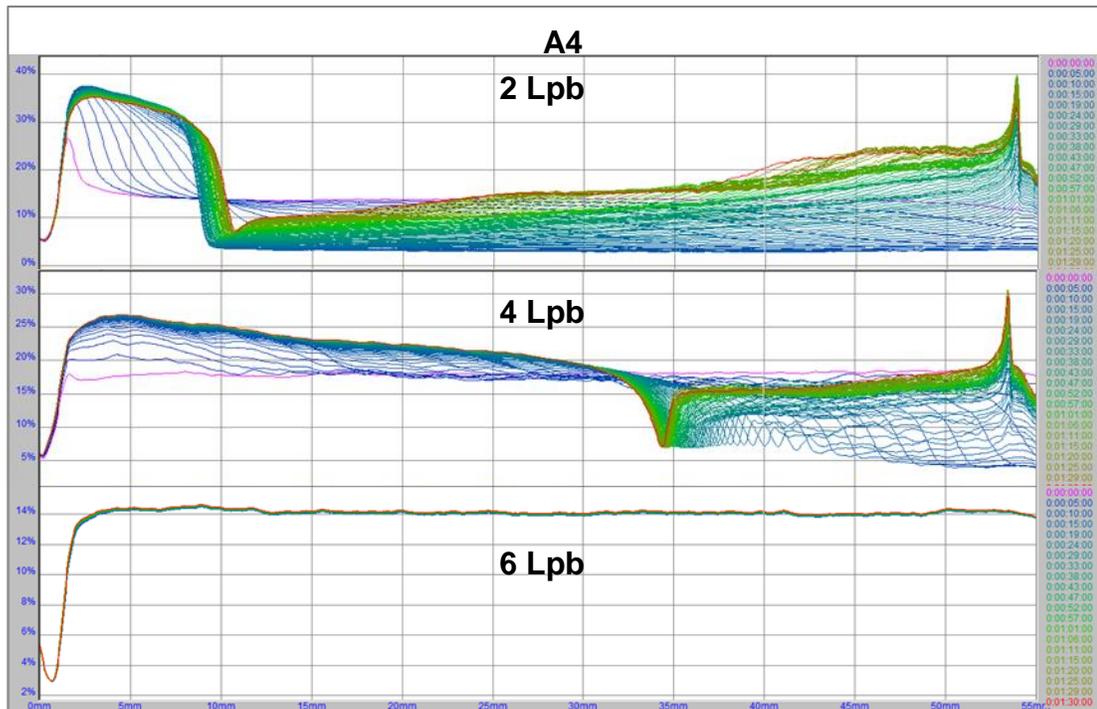


Figura N°25. Curvas de backscattering a distintas concentraciones de A4

En la figura N°25 se puede observar como las curvas de backscattering en concentraciones de A4 de 2 y 4 Lpb presentan grandes cambios al transcurrir el tiempo, donde se observan cambios de fase en la dispersión. Mientras que para una concentración de 6 Lpb las curvas se superponen entre si indicando que no hay presencia de fenómenos de inestabilidad como sedimentación o separación de fases. Es por ello que se toma la concentración de 6 Lpb para formular con los surfactantes sintetizados debido a que esta concentración garantiza la comparación efectiva de la dispersión de sólidos por parte del aditivo comercial de referencia y los productos a evaluar.

En la región A, se espera obtener altos valores de DBS cuando existe en la dispersión sedimentación de partículas sólidas. La presencia del surfactante en las dispersiones formuladas puede evitar que los sólidos decanten al fondo con rapidez, debido a que actúa en la superficie del sólido modificándola e interactuando de forma controlada con otras partículas que fomentan estabilidad. Los fenómenos de agregación, coagulación y sedimentación son irreversibles, pero el surfactante ayuda a que las probabilidades en que estos fenómenos ocurran sean menores.

Tabla N°9. Valores de Delta Backscattering para la región A de fluidos con aditivos evaluados a 6 Lpb.

Productos	DBS-A, %.				DesvEst
	P1	P2	P3	Promedio	
BLANCO	16,4	-	-	16,4	-
H1	0,02	0,01	0,23	0,09	0,13
A1	0,16	0,05	0,18	0,13	0,07
A2	0,41	0,94	0,26	0,54	0,36
A3	0,16	0,23	0,20	0,20	0,04
A4	0,29	0,23	0,27	0,26	0,03
A5	4,00	6,55	14,64	8,40	5,55
A6	18,35	7,46	18,73	14,85	6,40
A7	6,19	16,24	15,12	12,52	5,51

En la tabla N°9 se puede observar que los surfactantes disminuyeron la sedimentación y separación de fases con respecto al fluido sin surfactante.

El surfactante comercial de referencia H1, obtuvo el menor valor promedio de DBS-A de los fluidos formulados con 0,09%. En la figura N°26 se muestra el gráfico originado por el backscattering de la celda en 90 minutos (prueba 2), donde se puede notar que las curvas originadas se superponen entre si debido a que los valores de Backscattering en toda la longitud de la celda son similares, y se debe a que la dispersión se mantiene estable sin variación de la concentración de sólidos en la longitud de la celda.

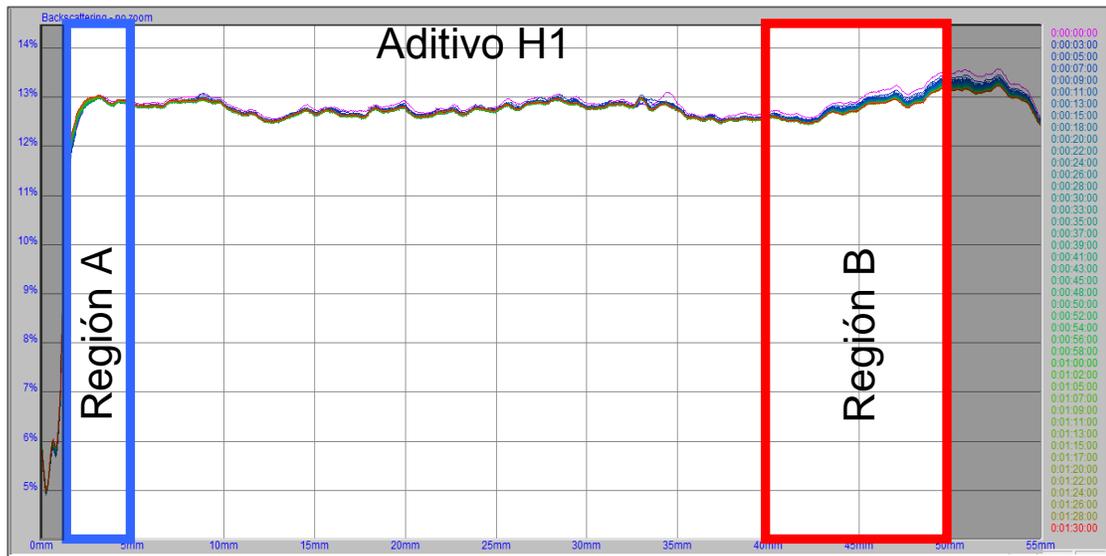


Figura N°26. Curvas de backscattering para fluido con aditivo H1

Los productos sintetizados con materia nacional A1, A2, A3 y A4 evitan la sedimentación de sólidos ya que obtuvieron los menores valores de DBS. Estos valores fueron menores al criterio de 1,00% de DBS para denotar sedimentación de sólidos al fondo del recipiente. El mayor valor de este grupo es el aditivo A2, el cual posee 0,54% de DBS-A promedio. El menor valor lo posee el aditivo A1, con 0,13% de DBS-A promedio, luego lo siguen A3 con 0,20% y A4 con 0,26%.

El producto sintetizado con materia prima A5, obtuvo altos valores de DBS-A en sus tres pruebas, siendo mayores que el criterio de selección propuesto,

este producto presentó sedimentación en el fondo del recipiente, por lo cual se dice que no es capaz de mantener en suspensión partículas de gran tamaño.

Los aditivos sintetizados con 100% de ácidos carboxílicos saturados e insaturados, A6 y A7 respectivamente, no son capaces de evitar la decantación de partículas sólidas de gran tamaño en la dispersión. El aditivo con 100% de saturados, A6, posee un valor de DBS-A promedio de 14,85% mientras que el aditivo con 100% de insaturados obtuvo un valor de 12,52%.

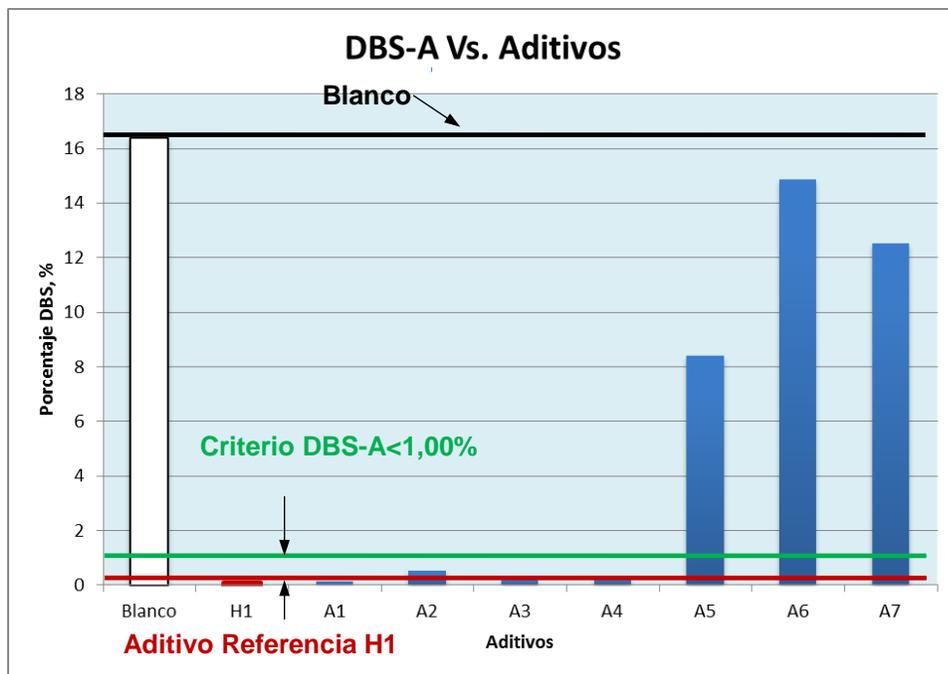


Figura N°27. Comparación de los criterios utilizados del blanco, el criterio DBS-A y el aditivo de referencia con los aditivos sintetizados

Comparando el valor del blanco se puede observar que los aditivos sintetizados disminuyen la cantidad o velocidad de caída de partículas sólidas manteniéndolas en suspensión. En la figura N°27 se observa que los aditivos que están por debajo del criterio de DBS-A menor a 1,00% son A1, A2, A3 y A4; quedan por fuera el aditivo sintetizado con materia prima importada A5, los aditivos sintetizados con 100% de saturados e insaturados, A6 y A7 respectivamente y el Blanco o formulación sin surfactante. Tomando

en cuenta el valor obtenido por el aditivo de referencia, quienes se acercan más a este valor son los aditivos A1, A3 y A4.

Para la región B, la cual está dispuesta en la parte superior del recipiente que contiene las dispersiones en una longitud de 40-50mm, se presenta a continuación los valores promedio obtenidos de dicha longitud para los aditivos evaluados.

Tabla N°10. Valores de Delta Backscattering para la región B de fluidos con aditivos evaluados a 6 Lpb.

Productos	P1	DBS-B, %.		Promedio	DesvEst
		P2	P3		
BLANCO	-9,07	-	-	-9,07	-
H1	-0,21	-0,07	-0,03	-0,10	0,09
A1	0,11	0,10	0,12	0,11	0,01
A2	0,03	7,43	0,27	2,58	4,20
A3	0,07	0,16	0,14	0,12	0,05
A4	0,03	0,06	0,14	0,08	0,06
A5	-2,48	-5,16	-5,52	-4,39	1,66
A6	8,31	20,18	13,73	14,07	5,94
A7	-2,57	-4,11	-4,32	-3,67	0,95

En la región B (ver tabla N°10), se obtuvo que los valores de Delta Backscattering más bajos que el criterio propuesto ($DBS-B < \pm 0,2$) fueron el aditivo comercial de referencia H1, y los aditivos sintetizados con materia prima nacional A1, A3 y A4. Los cuales no presentaron valores mayores que el criterio propuesto en las tres pruebas y poseen curvas de backscattering similares a las mostradas por el aditivo de referencia H1 (ver figura N°28). Para el aditivo sintetizado A2, solo la prueba 1 mostró un valor menor al criterio propuesto, sin embargo sus otras dos pruebas fueron mayores.

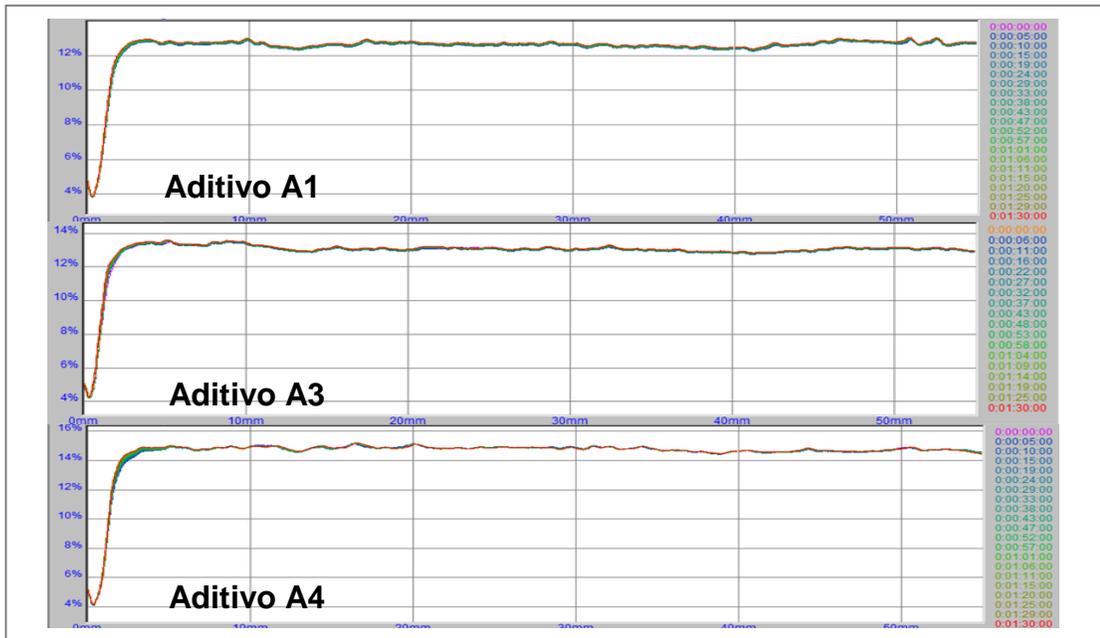


Figura N°28. Curvas de Backscattering para las dispersiones con los aditivos A1, A3 y A4

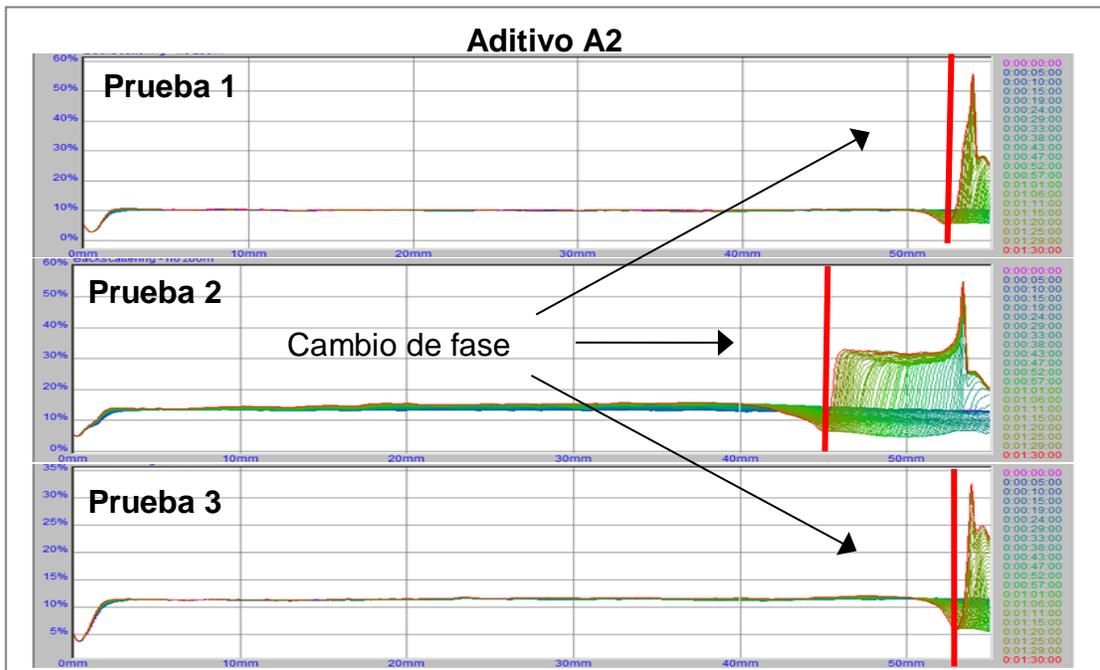


Figura N°29. Curvas de Backscattering de la dispersión con el aditivo A2

El aditivo A2 en las pruebas realizadas presenta separación de fases en 90 minutos de la prueba, esto se puede observar por el cambio de pendiente y la variación irregular del Backscattering para la parte superior de la celda (figura N°29). Este fenómeno de separación de fases se encuentra en las

pruebas 1 y 3, por encima de la longitud estudio de la región B, por esta razón no se pudo observar altos valores de Delta Backscattering. En la prueba 2 se obtiene un valor de DBS-B alto debido a que la separación de fases se encuentra entre la región de estudio.

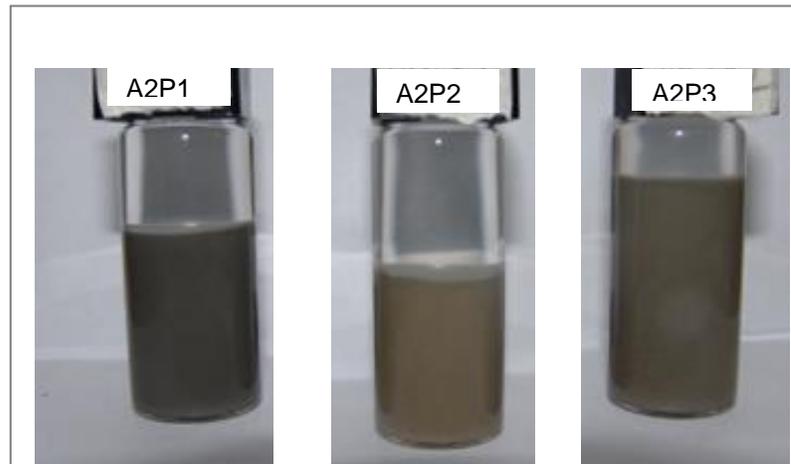


Figura N°30. Dispersiones de A2 luego de 90 minutos en reposo.

En la figura N°30 se puede observar la separación de fases en las soluciones formuladas con el aditivo A2 luego de 90 minutos en reposo, donde existe una fase dispersa de aceite y sólidos y otra fase donde solo se encuentra el aceite. Con esto se dice que el aditivo sintetizado A2 presenta floculación de sólidos y separación de fases, por lo cual no es eficiente como dispersante de sólidos en referencia al aditivo comercial H1.

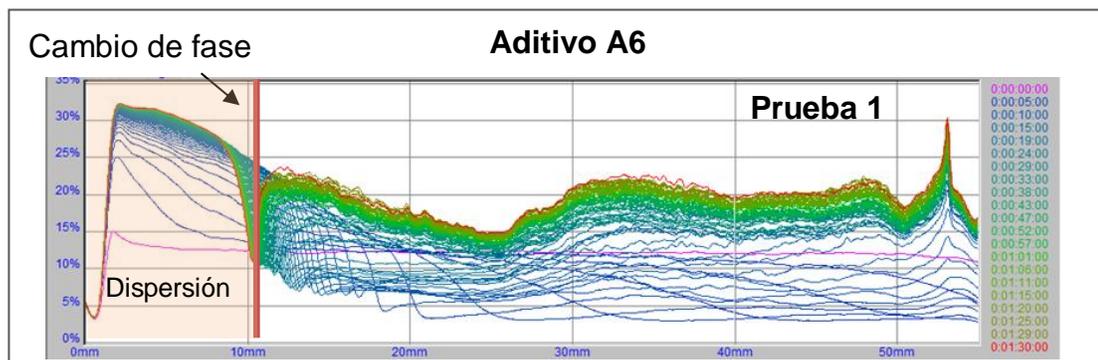


Figura N°31. Curvas de backscattering de la dispersión con el aditivo A6

Se puede observar que la dispersión con A6 es inestable, sedimenta al fondo del recipiente todos los sólidos inicialmente dispersos y con gran rapidez. El

aditivo A6 promueve la formación de flocúlos de gran tamaño que de manera ordenada se agrupan y sedimentan al fondo del recipiente, esto se puede ver en las figuras N°31 y 32.

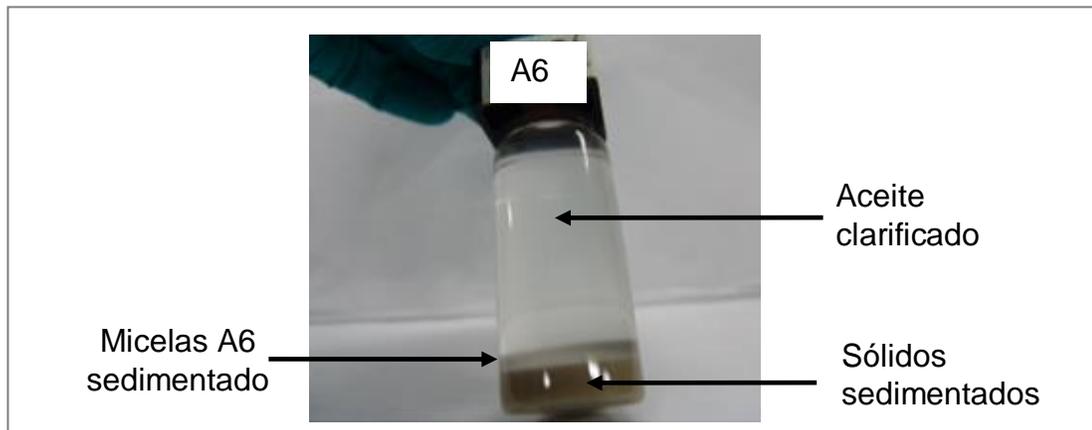


Figura N°32. Dispersión de A6 en 90 minutos (Prueba 1)

El aditivo sintetizado A6, además de fomentar la floculación de sólidos, crea micelas en forma de cristales blancos en el aceite. Este surfactante está sintetizado con 100% de ácidos saturados, que pueden ordenarse fácilmente para formar micelas y cristales. Esta misma capacidad de auto asociación es responsable de la floculación de los sólidos que han adsorbido este surfactante, la atracción de la cadena hidrófoba hace que se agrupe de manera ordenada y geométrica. Los sólidos por tanto precipitan en orden, desplazando el aceite por diferencia de densidad, por esto se presenta la clarificación del aceite, donde no hay presencia de sólidos dispersos.

Los aditivos sintetizados A5 y A7 tuvieron un comportamiento similar en las suspensiones formuladas. Estos aditivos presentaron sedimentación y un cambio de DBS-B negativo y mayor al criterio de estabilidad propuesto. El valor negativo indica una disminución de la cantidad de sólidos disueltos, pero aún se mantiene una suspensión, a una concentración de sólidos menor al inicial. En la siguiente figura se puede observar las curvas de Backscattering en 90 minutos, donde se presentan dos zonas en la dispersión.

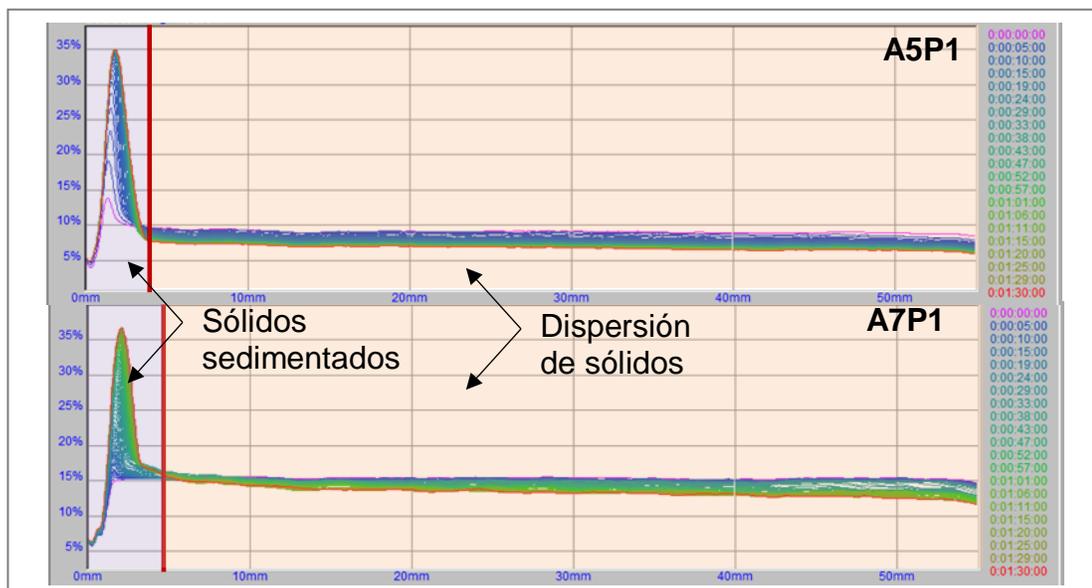


Figura N°33. Curvas backscattering para aditivos A5 y A7 (prueba 1)

Se puede observar que las curvas originadas son similares para ambos surfactantes sintetizados (figura N°33). Existe sedimentación de sólidos identificado por el máximo global de backscattering en el fondo y además una disminución de la concentración de sólidos en la dispersión luego de 90 minutos. En la dispersiones formuladas con A5 y A7 sedimentan los sólidos de mayor tamaño y densidad, dejando en suspensión aquellos sólidos que su movimiento browniano es notable y mayor al efecto de la gravedad.

Esta estabilidad la otorga el surfactante el cual no permite que los sólidos floculen o coagulen, ni formen agregados. El surfactante recubre la superficie de los sólidos y controla la distancia en la cual actúan las fuerzas de atracción o repulsión electrostáticas. La distancia y la interacción entre las partículas se deben a la cola hidrofóbica del surfactante, la cual está en su mayoría formada insaturados (94% en A5 y 100% en A7, ver figura N°17), que poseen fuerzas de cohesión menores entre sus partículas en relación a los ácidos grasos saturados.

La forma de las cadenas de ácidos grasos insaturados es irregular y (forma cis), no pueden formar micelas o asociarse debido a su impedimento estérico.

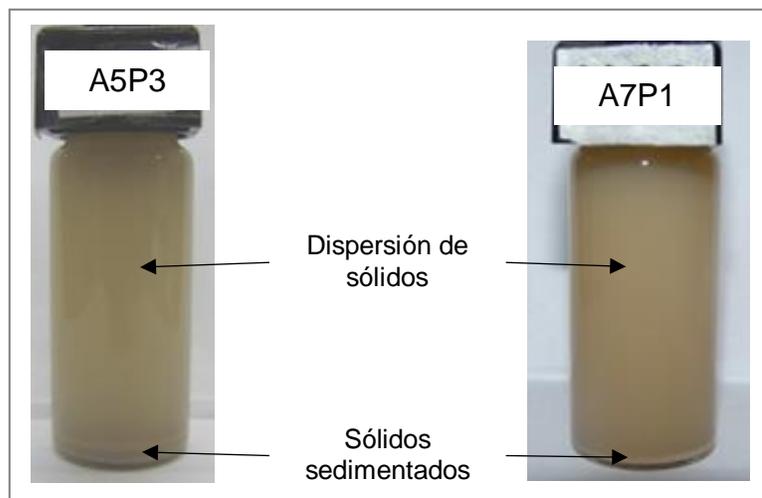


Figura N°34. Dispersiones de A5 (prueba 3) y A7 (prueba 1) luego de 90 minutos.

Se puede notar que los sólidos aún están dispersos en el aceite con una sedimentación de otros sólidos de mayor tamaño al fondo del recipiente (figura N°34). Por tanto se puede afirmar que el aditivo sintetizado con materia prima importada A5 no posee una buena capacidad de dispersión debido a que permite la sedimentación de sólidos de gran tamaño al no poseer fuerzas de cohesión necesarias para mantenerlos dispersos.

Luego de haber analizado los resultados de estabilidad de dispersión dada por los aditivos con menor rendimiento, se presenta a continuación las curvas de Backscattering de los aditivos que proveen mayor estabilidad de dispersión.

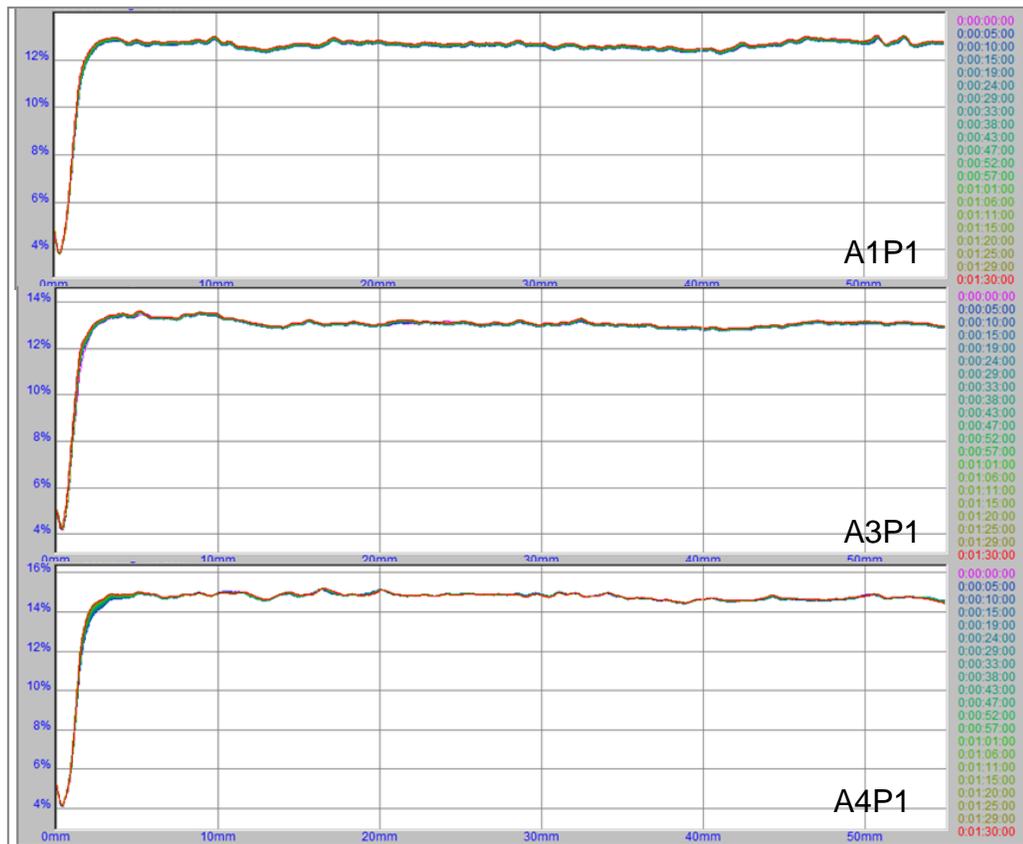


Figura N°35. Curvas de backscattering para dispersiones formuladas con A1, A3 y A4

Los productos sintetizados con materia prima nacional A1, A3 y A4 presentaron curvas de Backscattering que se superponen entre sí y comparando con los valores mostrados de DBS-A y DBS-B se puede decir que dichos surfactantes sintetizados son eficientes debido a que mantienen las dispersiones estables en 90 minutos de reposo (figura N°35).

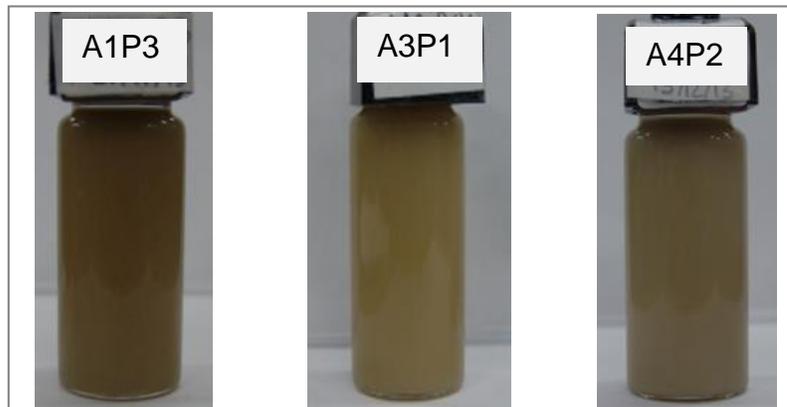


Figura N°36. Aditivos sintetizados con mejor rendimiento en la dispersión de sólidos

Las imágenes en la figura N°36 muestran que luego de 90 minutos la dispersión es estable, no se presencia sólidos sedimentados, clarificación o separación de fases.

4.3.2 Relación entre la proporción de ácidos saturados e insaturados en estabilidad de dispersión.

La actividad electrostática de la superficie de sólidos minerales como la arcilla organofílica, carbonatos y cal hace que ellos interactúen y se agreguen entre sí para sedimentar o formar flóculos. La estabilidad de dispersión de sólidos depende de la capacidad del dispersante de evitar la interacción descontrolada de partículas y generar fenómenos que hacen que las dispersiones sean inestables.

A continuación se mostrará la relación existente entre la proporción de ácidos carboxílicos saturados e insaturados en los productos sintetizados y la estabilidad de una dispersión de sólidos.

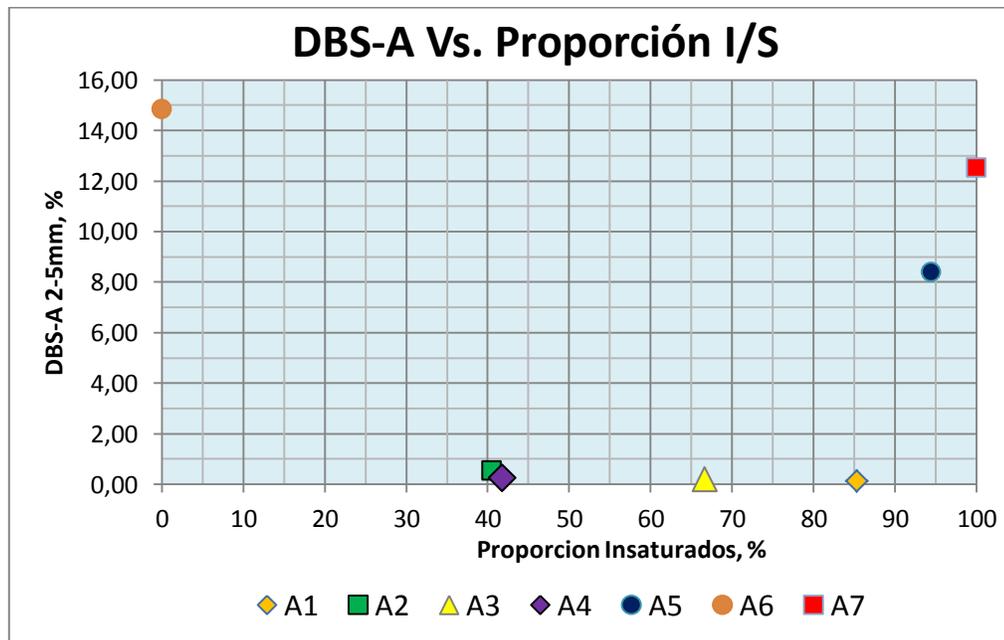


Figura N°37. Relación entre valor DBS-A y la proporción de saturados e insaturados de aditivos sintetizados.

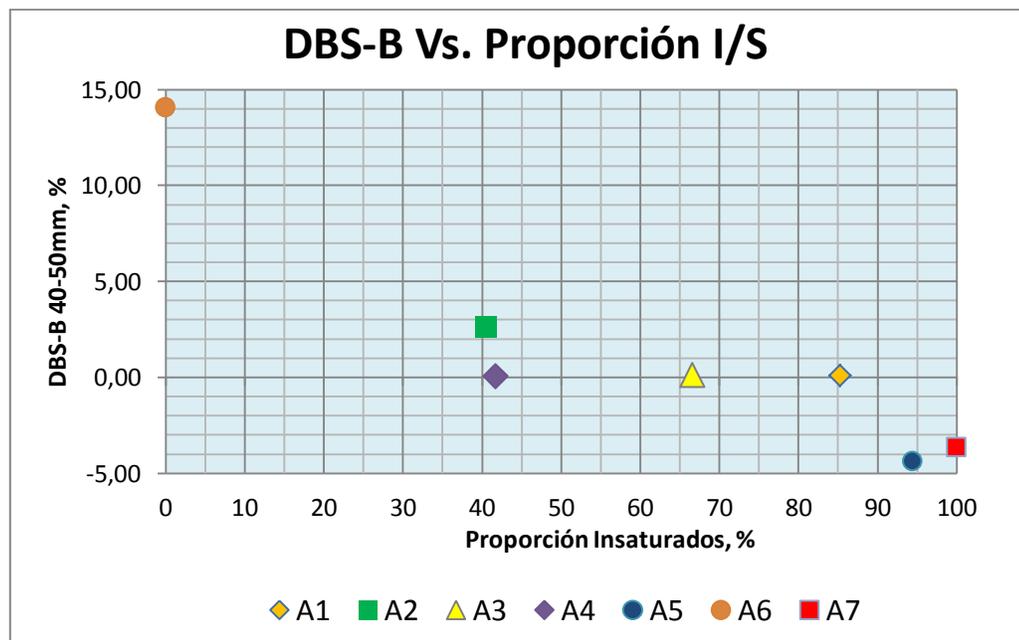


Figura N°38. Relación entre valor DBS-B y la proporción de saturados e insaturados de aditivos sintetizados.

En las figuras N°37 y 38 se pueden notar que para las proporciones extremas de los aditivos sintetizados con 100% de ácidos grasos saturados e insaturados, A6 y A7 respectivamente, poseen altas magnitudes de DBS. Como se dijo anteriormente el A6 con cadenas de ácidos grasos saturados al adherirse a la superficie de los sólidos aumenta agrupación de partículas debido a su interacción de atracción de las fuerzas de Van der Waals de sus cadenas lipofílicas, las cuales pueden orientarse con mayor facilidad debido fuerzas de cohesión mayores. El efecto de dispersión ofrecido por surfactantes de ácidos grasos insaturados se debe a menores fuerzas de Van der Waals por parte de sus cadenas lipofílicas, sin embargo la dispersión hace que los sólidos de mayor tamaño que las fuerzas de decanten al fondo.

Se evidencia entonces que la estabilidad en una dispersión de sólidos se debe al combinar las débiles fuerzas de cohesión los ácidos grasos saturados y la dispersión debido a menores fuerzas de cohesión de las superficies de los sólidos adsorbidos con surfactantes de ácidos grasos

insaturados. Se observa en las figuras N°37 y 38 que los surfactantes con proporciones de ácidos grasos insaturados/saturados intermedias, aumentan la estabilidad de las dispersiones. La proporción de ácidos grasos insaturados en las que se pueden obtener dispersión de sólidos en aceite mineral es de 42-85% según lo observado con las muestras sintetizadas.

Se recomienda realizar un barrido con proporciones controladas de ácidos grasos saturados e insaturados, para el estudio de estabilidad de dispersión, con productos con finalidad de encontrar el rango de proporción óptimo donde pueden obtenerse productos capaces de estabilizar una dispersión de sólidos.

4.4 DESEMPEÑO REOLÓGICO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE

4.4.1 Desempeño reológico a 6 Lpb

Se realizó la formulación de medio barril de fluido de perforación base aceite a 6 Lpb para la medición de las propiedades reológicas debido a la acción del óleo-humectante.

Tabla N°11. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 6 Lpb antes de envejecer.

Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Viscosidad Plástica, cP	22	22	17	18	19	22	17	17	17
Punto Cedente, Lb/100 pie ²	30	8	3	6	3	5	3	6	3
Gel 10"/10', Lb/100 pie ²	35/46	6/10	4/4	4/6	3/4	5/6	2/3	4/5	3/4

Empleando una concentración de surfactante de 6 Lpb se puede notar que antes de envejecer los fluidos formulados con los aditivos sintetizados, tienen viscosidades plásticas similares entre sí, con puntos cedentes bajos en relación al producto comercial H1 (ver tabla N°11). La fuerza de gel, fue de

tipo favorable para el H1 mientras que para los aditivos sintetizados son de tipo frágiles. Se observa que para el blanco, el punto cedente y la fuerza de gel son elevados, observándose en general la acción de los dispersantes en la reducción y mejoramiento de las propiedades reológicas de los fluidos.

Tabla N°12. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 6 Lpb después de envejecer a 300°F y 150 psi.

Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Viscosidad Plástica, cP	11	27	19	18	18	16	18	18	16
Punto Cedente, Lb/100 pie ²	109	24	0	2	0	1	4	2	1
Gel 10"/10', Lb/100 pie ²	114/120	11/15	2/2	2/3	2/4	1/5	2/4	2/2	2/4

Luego de envejecer en un horno de rolado a 300°F y 150 Psi, en general, la viscosidad plástica de los fluidos no varía en gran medida (figura N°39 y tabla N°12), con valores para los fluidos con los óleo-humectantes sintetizados entre 16 y 19 cP.

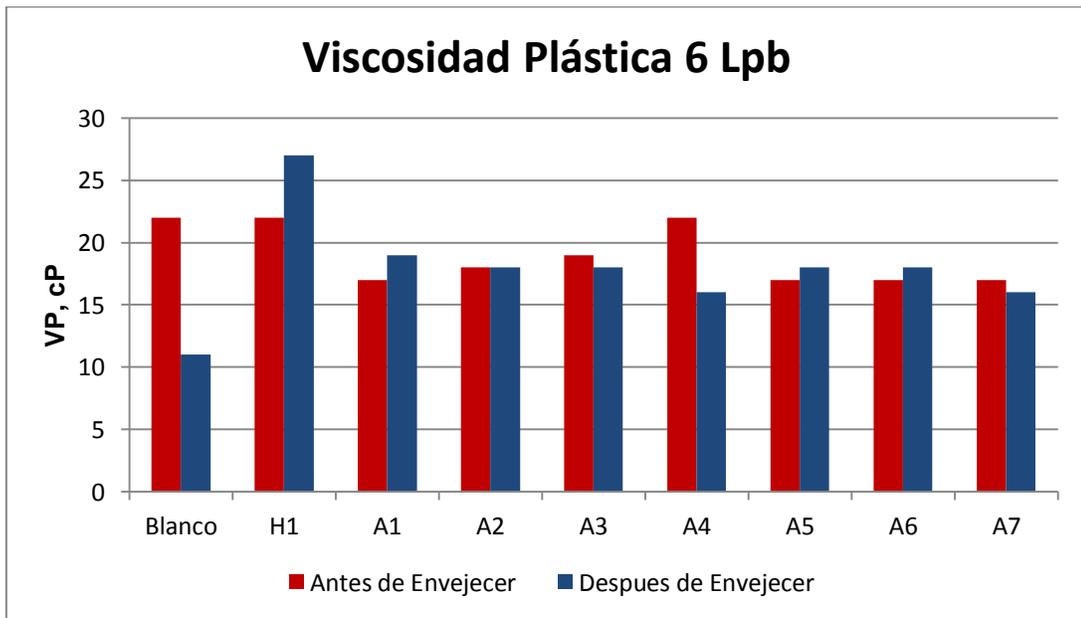


Figura N°39. Viscosidad plástica de fluidos de perforación base aceite formulados con una concentración de 6 Lpb

Sin embargo, se aprecia una notable reducción del punto cedente y la fuerza de gel llevándolo a valores donde se pierde esta propiedad fundamental para los fluidos de perforación con los dispersantes sintetizados, en comparación con el punto cedente del aditivo de referencia H1, cuyo valor aumentó luego del envejecimiento. En la figura N°40 se observa la diferencia entre el punto cedente del aditivo de referencia H1 y los sintetizados con valores bajos.

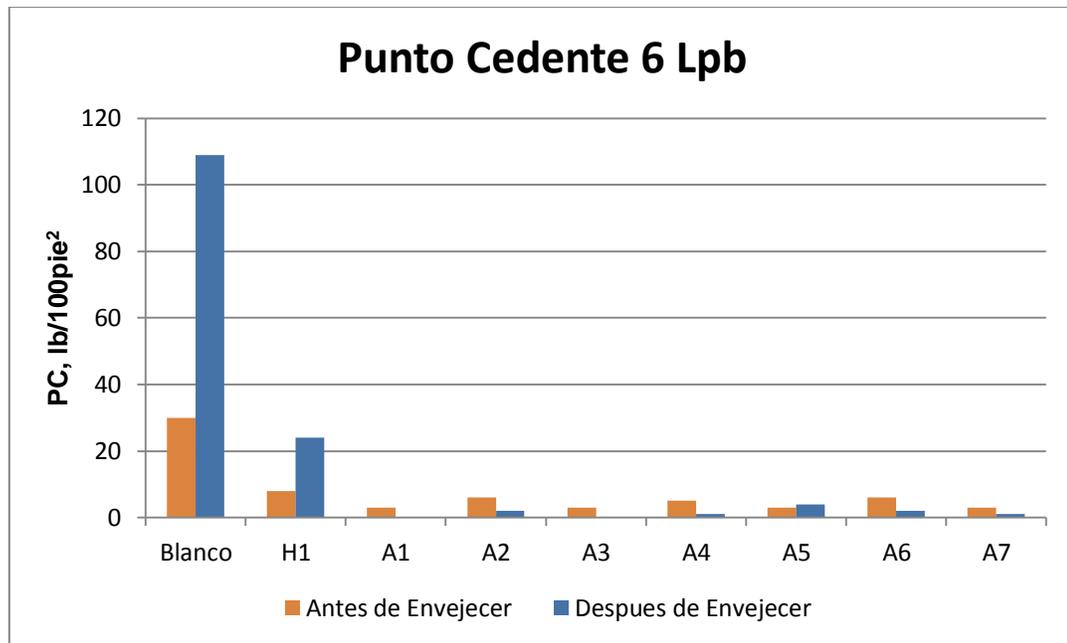


Figura N°40. Punto Cedente los fluidos de perforación base aceite formulados, antes y después del envejecer a 6 Lpb

El punto cedente es la propiedad del fluido de perforación que está relacionada con la limpieza de rípios y cortes de perforación del pozo. Los valores de punto cedente se deben a las interacciones entre las partículas las arcillas bentoníticas, por lo tanto un bajo punto cedente se debe a la baja interacción entre las arcillas, por una alta dispersión de ellas en el medio. La concentración a 6 Lpb de dispersantes sintetizados, son capaces de dispersar los sólidos al punto de bajar el punto de cedencia a cero, el cual implica que el fluido tiende a comportarse como un fluido newtoniano (Instituto Americano del Petróleo, 2001).

La fuerza de gel luego del envejecido se debilita y adquiere valores muy bajos de tipo frágiles para fluidos con óleo-humectantes sintetizados, mientras que en comparación con el aditivo H1 la fuerza de gel aumentó de 6/10 a 11/15 de tipo favorable (ver tabla N°12).

Tomando en cuenta que a 6 Lpb de aditivos sintetizados, se logra dispersar fuertemente los sólidos, se recomienda hacer la evaluación de los surfactantes a una concentración menor de 2 Lpb.

4.4.2 Desempeño reológico a 2 Lpb

A continuación se presenta los resultados de las pruebas de desempeño reológico empleando los aditivos sintetizados y el aditivo comercial de referencia.

Tabla N°13. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 2 Lpb antes de envejecer

Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Viscosidad Plástica, cP	26	32	19	17	18	17	16	20	19
Punto Cedente, Lb/100 pie ²	28	23	5	6	6	6	7	5	3
Gel 10"/10', Lb/100 pie ²	32/48	14/39	4/6	4/5	5/6	4/4	3/5	4/5	3/4

Nuevamente se formula un fluido de perforación sin surfactante para conocer el efecto resultante de la adición de los óleo-humectantes sintetizados y el aditivo de referencia. Se puede observar en la tabla N°13 que la viscosidad plástica y punto cedente son valores altos para el fluido sin surfactantes similar a la prueba en la tabla N°11. Este fluido se observó gelificado con altos valores de gel a 10 segundos y luego a 10 minutos. Estos altos valores de viscosidad plástica, punto cedente y fuerza de gel son desfavorables para una perforación. Se requiere una alta potencia de la bomba para vencer la resistencia de gel y el punto de cedencia para iniciar el movimiento del fluido

y la viscosidad del fluido en movimiento, lo cual hace inviable formular un fluido sin surfactante y cubrir el gasto energético para hacer que fluya en el pozo.

El aditivo comercial de referencia H1, también posee altos valores de viscosidad plástica y punto de cedencia, con diferencia en su fuerza de gel que inicialmente tiene un valor intermedio y luego en 10 minutos aumenta a más del doble. La fuerza de gel es un factor importante de los fluidos de perforación ya que esta característica permite suspender los recortes cuando el fluido se encuentra estático mientras que se efectúan las conexiones de tuberías entre otras situaciones durante las cuales no se hace circular el fluido (Instituto Americano de Petróleo, 2001).

Para los fluidos de perforación formulados con los aditivos sintetizados resultaron en una disminución general de la viscosidad plástica, el punto de cedencia y la fuerza de gel. Esta disminución de propiedades refleja la capacidad de los surfactantes sintetizados que tienen para la dispersión de los sólidos, al aumentar la distancia entre ellos las fuerzas electrostáticas de las superficies de los sólidos se reducen y con ello la fricción y la viscosidad general del fluido. Los valores de fuerza de gel se muestran como geles planos, no aumentan a razón del tiempo de manera significativa.

La viscosidad de un fluido de perforación debe ser suficientemente bajo para hacer que el fluido se mueva con facilidad, y a su vez suficientemente alta para que los cortes de perforación suspendan y puedan ser transportados (CIED, 2002). Además las propiedades del fluido deben ser constantes luego de ser usados. Por tanto, se muestran a continuación los valores de desempeño reológico luego de envejecer el fluido en un horno de rolado a 300°F y con una presión de 150psi.

Tabla N°14. Propiedades reológicas de fluidos de perforación base aceite con aditivos a 2 Lpb después de envejecer a 300°F y 150 psi

Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Viscosidad Plástica, cP	31	23	20	20	19	18	19	18	21
Punto Cedente, Lb/100pie²	106	16	7	6	7	7	8	10	9
Gel 10"/10', Lb/100pie²	115/118	15/25	5/10	5/6	4/9	4/6	6/14	4/10	7/16

Luego de envejecer los fluidos de perforación pueden presentar problemas de floculación el cual vuelve al fluido en un lodo. En la tabla N°14 se puede observar el aumento de propiedades reológicas para la formulación sin óleo-humectante el cual aumenta vertiginosamente el punto cedente y la fuerza de gel. Esta floculación se debe a la acción de las arcillas organofílicas quienes cumplen como viscosificantes del fluido. Las arcillas forman agregados coagulados con los sólidos disueltos, las fuerzas electrostáticas hacen que los sólidos se ordenen según su carga eléctrica haciendo que la fuerza requerida para que las láminas se muevan entre si sean mayores.

El aditivo de referencia H1, disminuyó sus propiedades reológicas generales luego del envejecido del fluido. Estos nuevos valores siguen siendo favorables para el fluido formulado. La disminución de sus propiedades se debe a las condiciones del envejecido. Los surfactantes mejoran su capacidad de adsorción en las superficies de los sólidos, debiéndose al tiempo de contacto mayor y la difusión del surfactante en los sólidos.

Los surfactantes sintetizados cambiaron ligeramente sus propiedades reológicas dando como resultado un aumento de la fuerza de gel de los fluidos. Solo el A6 presentó sólidos sedimentados al fondo del recipiente (Barita).

En la siguiente figura se presentan los cambios producidos para las propiedades reológicas para los fluidos formulados a 2 Lpb.

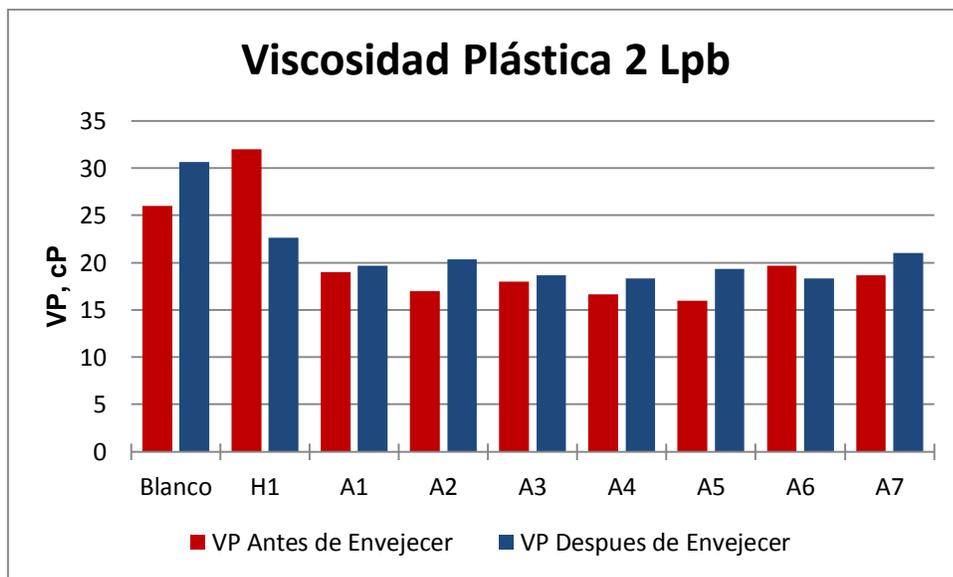


Figura N°41. Variación de la viscosidad plástica para los fluidos formulados a 2Lpb , antes y después del envejecimiento

A continuación se muestra la variación en porcentajes entre la viscosidad plástica antes y luego de envejecer

Tabla N°15. Porcentaje de variación de la viscosidad plástica de los fluidos de perforación, antes y luego de envejecer

Productos	Porcentaje de Variación VP, %.
Blanco	18
H1	-29
A1	4
A2	20
A3	4
A4	10
A5	21
A6	-7
A7	13

Según la tabla N°15 Solo el aditivo de referencia H1, obtuvo valores de variación de la viscosidad plástica levemente mayor al criterio establecido de $\pm 25\%$. Dicha variación no representa mayor problema para un fluido de perforación envejecido. Los fluidos de perforación deberían mantener sus propiedades en el hoyo a condiciones dinámicas y estáticas. Los fluidos de

perforación formulados con los surfactantes sintetizados presentaron pequeñas variaciones de viscosidad plástica, con valores generales de 16-21cP (ver figura N°41).

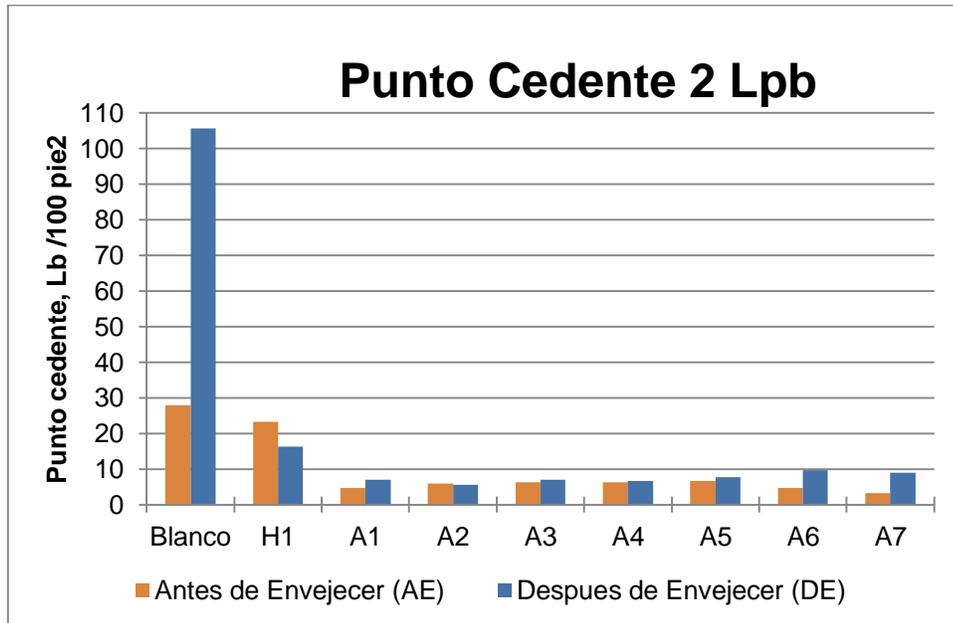


Figura N°42. Punto Cedente los fluidos formulados a 2 Lpb, antes y después del envejecimiento

En relación al punto cedente, los valores obtenidos para los aditivos sintetizados fueron bajos en relación al mostrado por el aditivo de referencia H1 (ver figura N°42). Los aditivos que generaron el mayor cambio luego del envejecimiento fueron el A7 y A6 aumentando en el doble de su valor inicial. En cambio los aditivos sintetizados con materia prima nacional (A1, A2, A3, A4) y materia prima importada (A5) presentaron valores generales entre 5-8 Lb /100 pie².

Debido a la acción de los surfactantes sintetizados en las superficies de los sólidos disueltos, sus interacciones electrostáticas se ven controladas por el efecto estérico de las cadenas lipofílicas con lo cual los sólidos disminuyen la actividad superficial y logran moverse con facilidad, ya que la resistencia electrostática ha sido disminuida. Conforme a lo observado en los valores obtenidos se puede decir que los aditivos sintetizados ofrecen mayor

dispersión de sólidos que el aditivo de referencia. Además con el envejecimiento mejora sus propiedades.

Tabla N°16. Clasificación de geles de los fluidos formulados antes y después de envejecer.

Producto	Antes de envejecer		Después de envejecer	
	10"/10'	Clasificación	10"/10'	Clasificación
Blanco	32/48	Instantáneo	115/118	Instantáneo
H1	14/39	Progresivo	15/25	Favorable
A1	4/6	Favorable	5/10	Favorable
A2	4/5	Favorable	5/6	Favorable
A3	5/6	Favorable	4/9	Favorable
A4	4/4	Favorable	4/6	Favorable
A5	3/5	Favorable	6/14	Favorable
A6	4/5	Favorable	4/10	Favorable
A7	3/4	Favorable	7/16	Favorable

Se puede observar que según la clasificación en la figura N°2 los aditivos sintetizados ofrecen fluidos con fuerzas de gel favorables, mejorando su desempeño luego de envejecer (tabla N°16). Mientras que el aditivo comercial H1 inicialmente posee valores de tipo progresivo y luego de envejecer y aumentar su eficacia como dispersante de sólidos la fuerza de gel disminuye hasta ser de tipo favorable. Por ultimo una formulación sin surfactante es de tipo instantáneo.

Los surfactantes sintetizados en general ofrecen al fluido de perforación propiedades reológicas favorables antes y después del envejecimiento (a excepción de A6 que presenta sólidos precipitados como barita, y floculación en el fluido). En comparación al aditivo de referencia, los aditivos sintetizados dispersan aún más los sólidos disminuyendo su interacción electrostática y las propiedades reológicas empleando la misma concentración de surfactante. Este valor implicaría que el fluido de perforación según modelo

de plástico de Bingham la línea recta partiría desde el origen, comportándose como un fluido newtoniano.

Tomando en cuenta la dispersión de sólidos obtenidas para una formulación de fluidos de perforación con 2 Lpb de surfactante sintetizados, se recomienda para siguientes investigaciones estudiar el desempeño reológico en concentraciones menores para determinar el valor mínimo de surfactante que se requiere para cumplir con las especificaciones de perforación.

4.5 EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE OLEOHUMECTANTES

A continuación se presenta la selección de surfactantes con mejor rendimiento en base a las pruebas obtenidas de cambio de mojabilidad, estabilidad de dispersión y desempeño reológico en fluidos de perforación. Para ello se evaluara individualmente los surfactantes en estudio según los resultados obtenidos en cada prueba.

4.5.1 Evaluación de cambio de mojabilidad

En la tabla N°17 se observa que para el valor del blanco en el cual no se agregó dispersante en el aceite se le asigna un valor de 1 punto, y para el aditivo comercial de referencia H1 se le asigna un valor de 20 puntos por obtener el mayor valor de cambio de ángulo de contacto. Para valores entre el blanco y el aditivo de referencia se asignan valores entre 1 y 20 puntos de manera proporcional al cambio de ángulo de contacto con respecto al blanco.

Tabla N°17. Evaluación de oleohumectantes según prueba de cambio de mojabilidad por ángulo de contacto.

	MEDICIONES ÁNGULO DE CONTACTO, °.		Variación con respecto al blanco, °.		Criterio de mojabilidad	Puntaje
	Izq.	Der.	Izq.	Der.		
BLANCO	40,6	41,1	-	-	Mojable al agua	1
H1	140,2	140,4	99,6	99,8	Mojable al aceite	20
A1	78,9	75,6	38,3	35,0	Poco mojable al aceite	8
A2	74,8	72,0	34,2	31,4	Poco mojable al aceite	7
A3	68,7	66,9	28,1	26,3	Poco mojable al aceite	6
A4	95,9	96,1	55,3	55,5	Mojabilidad Intermedia	11
A5	63,3	64,5	22,7	23,9	Poco mojable al aceite	5
A6	71,0	70,1	30,4	29,5	Poco mojable al aceite	6
A7	63,9	62,9	23,3	22,3	Poco mojable al aceite	5

4.5.2 Evaluación de estabilidad de dispersión

En relación al estudio del cambio de la estabilidad de dispersión los puntajes asignados para la evaluación de óleo-humectantes en la tabla N°18, fue de 0 puntos para el blanco (dispersión de sólidos sin surfactantes), 20 puntos para aquellos que obtuvieron valores de DBS en ambas regiones menores al criterio establecido en su valor absoluto (DBS-A < 1% y para DBS-B < 0,2%) y 10 puntos para valores intermedios de DBS.

Tabla N°18. Evaluación de oleohumectantes en prueba de estabilidad de dispersión

	DBS-A, %	Pts.	DBS-B, %	Pts.	Pts. Promedio
Blanco	16,4	0	-9,07	0	0
H1	0,09	20	-0,10	20	20
A1	0,13	20	0,11	20	20
A2	0,54	20	2,58	10	15
A3	0,20	20	0,12	20	20
A4	0,26	20	0,08	20	20
A5	8,40	1	-4,39	10	6
A6	14,85	1	14,07	0	1
A7	12,52	1	-3,67	10	6

4.5.3 Evaluación del desempeño reológico

Tabla N°19. Evaluación de oleohumectantes en prueba de estabilidad de dispersión para los fluidos formulados con aditivos óleo-humectantes a 2 Lpb

	Var VP, %	Pts. VP	PC <H1	Pts. PC	Tipo Gel (AE / DE)	Pts. Gel	Puntaje Promedio
Blanco	18	20	>	0	Inst/Inst.	2	7
H1	29	16	=	20	Prog/Fav	16	17
A1	4	20	<	20	Fav/Fav	20	20
A2	20	20	<	20	Fav/Fav	20	20
A3	4	20	<	20	Fav/Fav	20	20
A4	10	20	<	20	Fav/Fav	20	20
A5	21	20	<	20	Fav/Fav	20	20
A6	7	20	<	20	Fav/Fav	20	20
A7	13	20	<	20	Fav/Fav	20	20

Para la asignación de puntos en el desempeño reológico de fluidos de perforación formulados con los dispersantes sintetizados, se establece que para el parámetro de viscosidad plástica se otorga 20 puntos al aditivo que

permanece en el criterio de variación $VP < \pm 25\%$. Para el parámetro de punto de cedencia se otorga 20 puntos quienes están por debajo del valor de punto de cedencia del aditivo comercial H1 y 0 puntos quienes estén por encima de este. Para el tipo de gel se otorgan 10 puntos si es favorable, 6 puntos si es progresivo, 0 puntos si es frágil o instantáneo, y se suma el puntaje del tipo de gel antes y después de envejecer. En la tabla N°19 se observa los puntajes para la evaluación del desempeño reológico de los fluidos formulados.

4.5.4 Evaluación general

A continuación en la tabla N°20 se presenta la puntuación total de los aditivos evaluado.

Tabla N°20. Evaluación general de dispersantes

	Puntaje Cambio de Mojabilidad	Pond (20%)	Puntaje Estabilidad de dispersión	Pond (40%)	Puntaje Desempeño reológico	Pond (40%)	Total
H1	20	4	20	8	17	6,8	19
A1	8	1,6	20	8	20	8	18
A2	7	1,4	15	6	20	8	15
A3	6	1,2	20	8	20	8	17
A4	11	2,2	20	8	20	8	18
A5	5	1	6	2,4	20	8	13
A6	6	1,2	1	0,4	19	7,6	9
A7	5	1	6	2,4	19	7,6	11

Los aditivos sintetizados con 100% ácidos carboxílicos saturados (A6) y 100% insaturados (A7). Presentaron rendimientos deficientes en las pruebas cambio de mojabilidad y estabilidad de dispersión aunque en la prueba de desempeño reológico presentaron valores aceptables, aunque el aditivo A6

presentó flóculos de gran tamaño y sedimentación de barita. Estos aditivos con sus porcentajes de proporción extrema sirvieron para destacar el efecto dispersante de los aditivos con proporciones intermedias de ácidos grasos saturados e insaturados. Generando así que la eficiencia de estos surfactantes sintetizados se debe a una proporción óptima de dichos ácidos para aumentar la eficiencia de dispersión y su estabilidad.

El aditivo sintetizado con materia prima importada A5 presentó un bajo rendimiento en cambio de mojabilidad y estabilidad de dispersión y aunque el desempeño reológico presento valores aceptables, la prueba de estabilidad de dispersión indica que este surfactante sintetizado no es capaz de suspender sólidos de gran tamaño. Ante esta desventaja se descarta el aditivo A5 como materia prima para la síntesis de surfactante desarrollado en PDVSA-Intevep.

El aditivo sintetizado A2 posee un desempeño aceptable en reología, sin embargo tuvo un pobre rendimiento en pruebas de cambio de mojabilidad y de estabilidad de dispersión. Su proporción de ácidos grasos es similar al aditivo A4 por cuanto se debería realizar un estudio de este aditivo y su materia prima para observar si posee otros compuestos y sustancias que desmejoran la eficiencia como dispersantes y oleo-humectantes.

Por otro lado se puede observar los aditivos sintetizados con materia prima nacional A1, A3 y A4 obtuvieron los mejores desempeños generales (Tabla N°20). Tan solo el A4 logró obtener el mayor cambio de mojabilidad de la superficie de cuarzo, obteniéndose una superficie con mojabilidad media al agua y aceite, mientras que los aditivos A1 y A3 también mostraron un cambio positivo de la mojabilidad al aceite. En las pruebas de estabilidad de dispersión, estos tres aditivos mostraron su capacidad de estabilización de sólidos sin presentar sedimentación de ellos. Su desempeño reológico en formulaciones de fluidos de perforación fue aceptable dentro de los

parámetros, variando poco su viscosidad plástica y punto cedente, mejorando su fuerza de gel luego de envejecer.

Los aditivos A1, A3 y A4 son elegidos como productos con el mejor desempeño de las pruebas realizadas y se recomienda emplear dichas materias primas para la optimización de su síntesis, además de optimizar pruebas de desempeño reológico, caracterización fisicoquímica, determinación de concentración micelar crítica, y balance hidrofílico lipofílico, Potencial Z, análisis termo gravimétrico, mojabilidad de superficies minerales entre otros.

Entre otros resultados obtenidos se debe resaltar el desarrollo de un método de análisis para surfactantes en fluidos de perforación base aceite, en el cual dicho surfactantes se caracterizaron, se determinó su capacidad de cambiar la mojabilidad de superficies sólidas, su actividad en la estabilidad de dispersiones sólido-líquido además de su desempeño para la estabilidad de sus propiedades reológicas en fluidos de perforación base aceite luego de condiciones de trabajo a altas temperaturas, este método permitió evaluar los aditivos comparándolo con otros en el mercado y presenta puntos importantes para la valoración final de los productos de interés. Por tanto es de destacar para el presente Trabajo Especial de Grado, un logro final, probar una metodología que puede ser utilizada como punto de referencia para futuras evaluaciones de productos similares como emulsionantes líquido-líquido, y gas en líquido, y también antagonistas como floculantes, detergentes y jabones.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones establecidas de acuerdo con los objetivos del Trabajo Especial de Grado, tomando en cuenta sus resultados y análisis en el capítulo anterior.

- Los aditivos sintetizados muestran altos valores de acidez (TAN), indicando así la presencia de surfactantes ácidos.
- Se determinaron proporciones de 41, 42, 67 y 85% de ácidos grasos insaturados para los aditivos nacionales (A2, A4, A3 Y A1, respectivamente) y el aditivo sintetizado con materia prima importada con 96% de insaturados (A5).
- Los aditivos sintetizados mostraron un cambio de mojabilidad de la superficie de cuarzo inicialmente no mojable al aceite, a una superficie con mojado al aceite.
- Solo los aditivos sintetizados A1, A3 y A4 tuvieron alto desempeño como dispersantes al no presentar inestabilidad en las dispersiones formuladas.
- Existe una relación entre la estabilidad de dispersión y la proporción de ácidos grasos saturados e insaturados en los surfactantes sintetizados, los surfactantes que contribuyeron mejor estabilidad poseían una proporción de insaturados de 42 a 85% (A1, A3 y A4).
- Los surfactantes con cadenas insaturadas al adsorberse en la superficie de los sólidos reducen las fuerzas de cohesión entre las partículas, mientras que los surfactantes con cadenas saturadas tienen mayores fuerzas de cohesión que generan fenómenos de floculación-precipitación.

- En proporciones controladas de ácidos grasos saturados e insaturados se promueve la estabilidad de sólidos en dispersión.
- A concentraciones de 6 Lpb de surfactantes sintetizados, el fluido de perforación pierde punto de cedencia y fuerza de gel haciendo se comporten como fluidos newtonianos, perdiendo la capacidad de limpieza de pozos y suspensión de cortes de perforación.
- Los aditivos sintetizados empleados en el fluido de perforación base aceite a 2 Lpb disminuyeron la viscosidad plástica del fluido de perforación, manteniéndolo con valores favorables entre 16-21 cP, con poca variación después del envejecido.
- El punto de cedencia de los fluidos formulados a 2 Lpb con los aditivos sintetizados fueron menores que el aditivo comercial de referencia, con valores entre 5-10 Lb/100pie².
- La fuerza de gel de los fluidos formulados con los óleo-humectantes sintetizados a una concentración de 2 Lpb con un comportamiento de tipo “favorable” antes y después de envejecer.
- El envejecimiento de fluidos formulados con aditivos sintetizados a 2 Lpb no representó cambios significativos en ellos en propiedades reológicas.
- Los aditivos sintetizados seleccionados tomando en cuenta su rendimiento en pruebas de cambio mojabilidad, estabilidad de dispersión y desempeño reológico antes y después de envejecer fueron los nacionales A1, A3 y A4.

RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta las experiencias y resultados obtenidos en el laboratorio así como las conclusiones se muestra a continuación recomendaciones para próximas investigaciones a partir de la metodología empleada y de los productos seleccionados.

- Realizar pruebas de caracterización basadas en balance hidrofílico lipofílico y concentración micelar crítica de los aditivos seleccionados.
- Evaluar el cambio de mojabilidad en otras superficies minerales tales como arcillas organofílica, cal, carbonatos, barita entre otros, para observar de manera individual la eficiencia de adsorción de los óleo-humectantes en los sólidos empleados en la formulación de fluidos de perforación.
- Evaluar el rendimiento de los aditivos sintetizados como emulsificantes (emulsiones W/O), determinando sus propiedades reológicas y pruebas correspondientes.
- Evaluar la estabilidad de dispersión de sólidos empleando concentraciones menores de 6 Lpb de los aditivos seleccionados.
- Evaluar la estabilidad de dispersión de sólidos empleando arena, barita y otros, mediante formulaciones con los aditivos sintetizados.
- Realizar un estudio en profundidad con aditivos con proporciones controladas de ácidos grasos saturados e insaturados para determinar la proporción óptima en la cual se logra la estabilidad en dispersión de sólidos.
- Evaluar el desempeño reológico de fluidos de perforación formulados con los surfactantes sintetizados seleccionados a distintas densidades.

CAPITULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, D. (2002). Estudio del efecto de la adición del compuesto Z-Trol 60 como emulsificantes y humectante en fluidos de perforación base aceite. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Los Teques, Venezuela.
- Arias, F. (1999) El proyecto de investigación: Guía para su elaboración. 6ta edición. Editorial episteme. Caracas.
- Ayala, V. (2004). Síntesis y evaluación de aditivos a partir de aceite vegetal nacional para lodos de perforación. Trabajo especial de grado. Universidad Metropolitana. Caracas: Venezuela.
- Baker Hughes Incorporated. (s.f.). Especificaciones de Producto CARBOMUL-HT. Consultado el 19 de enero de 2015. Disponible en <http://www.bakerhughes.com>.
- Centro Internacional de Educación y Desarrollo. (2002). Manual de fluidos de perforación. Caracas: Prieto et al.
- Formulaction (s.f.) Smart solutions for dispersions characterization. Consultado el 01 de marzo de 2014. disponible en: http://www.formulaction.com/public_download/catalogue.pdf
- Gea J., P. M. (2006). Mojado de superficies en condiciones de no-equilibrio sobre superficies reales. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Granada.
- Instituto Americano del Petróleo. (2001). Manual de fluidos de perforación: procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. Texas.

- Instituto Nacional de Estadística. (2012). Sistema de Consulta de Estadísticas de Comercio Exterior: Importaciones. Consultado 3 de abril de 2014. Obtenible en <http://www.ine.gov.ve/comerciojsp/testpage.jsp>
- Lummus, J. y Azar, J. (1986). Drilling fluids optimization a practical field approach. Penn Well Books. Tulsa, Oklahoma.
- Meléndez, H. (2007). Estudio de la alteración de la mojabilidad mediante el uso de un surfactante natural en el sistema aceite/agua/SiO₂. trabajo especial de grado. Universidad de los andes. Los Teques, PDVSA Intevep.
- Mengual, O. et al.(1999). TURBISCAN MA 2000: Multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis. Talanta (Volume 50, issue 2): Pág. 445-456.
- OFITE (2013). Instruction manual, model 800 viscosimeter. Consultado el 12 de febrero de 2014. Obtenible <http://www.ofite.com/instructions/130-10.pdf>
- Salager, J. (2002). Fenómenos interfaciales en dispersiones polifásicas y en medios porosos. Cuaderno FIRP S122-N. Universidad de Los Andes. Versión N°5. Mérida, Venezuela.
- Skalli, I. et al. (2006). Surface and core wetting effects of surfactants in oil-based drilling fluids. Journal of petroleum science and engineering, (Volumen 52): Pág. 253-260.
- Weiss, C. (1985) Investigación evaluativa. México: Editorial Trillas.

APÉNDICE A

A continuación se presenta la estadística de resultados para la determinación del cambio de mojabilidad por medición de ángulo de contacto.

Tabla N°21. Estadística de mediciones de ángulo de contacto de gota posada.

MUESTRA	MEDICIONES ÁNGULO DE CONTACTO, °.									
	Gota 1		Gota 2		Gota 3		PROMEDIO		DesvEst	
	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D
BLANCO	39,5	39,5	40,9	42,3	41,4	41,4	40,6	41,1	1,0	1,4
H1	139,8	139,6	141,3	141,5	139,5	140	140,2	140,4	1,0	1,0
A1	79,8	75,4	78,3	75,2	78,6	76,1	78,9	75,6	0,8	0,5
A2	74,9	73,3	72,5	69,3	77,1	73,3	74,8	72,0	2,3	2,3
A3	72,5	67,6	69,1	69,6	64,4	63,5	68,7	66,9	4,1	3,1
A4	93,4	94,3	95,4	95,5	98,9	98,5	95,9	96,1	2,8	2,2
A5	58,4	60,4	67,3	67,5	64,1	65,7	63,3	64,5	4,5	3,7
A6	71,1	69,5	73,4	75,3	68,5	65,5	71,0	70,1	2,5	4,9
A7	66,7	62,5	59,3	63,1	65,6	63,2	63,9	62,9	4,0	0,4

APÉNDICE B

A continuación se muestran todas las curvas de backscattering obtenidas para el estudio de estabilidad de dispersión de surfactantes sintetizados a una concentración de 6 Lpb.

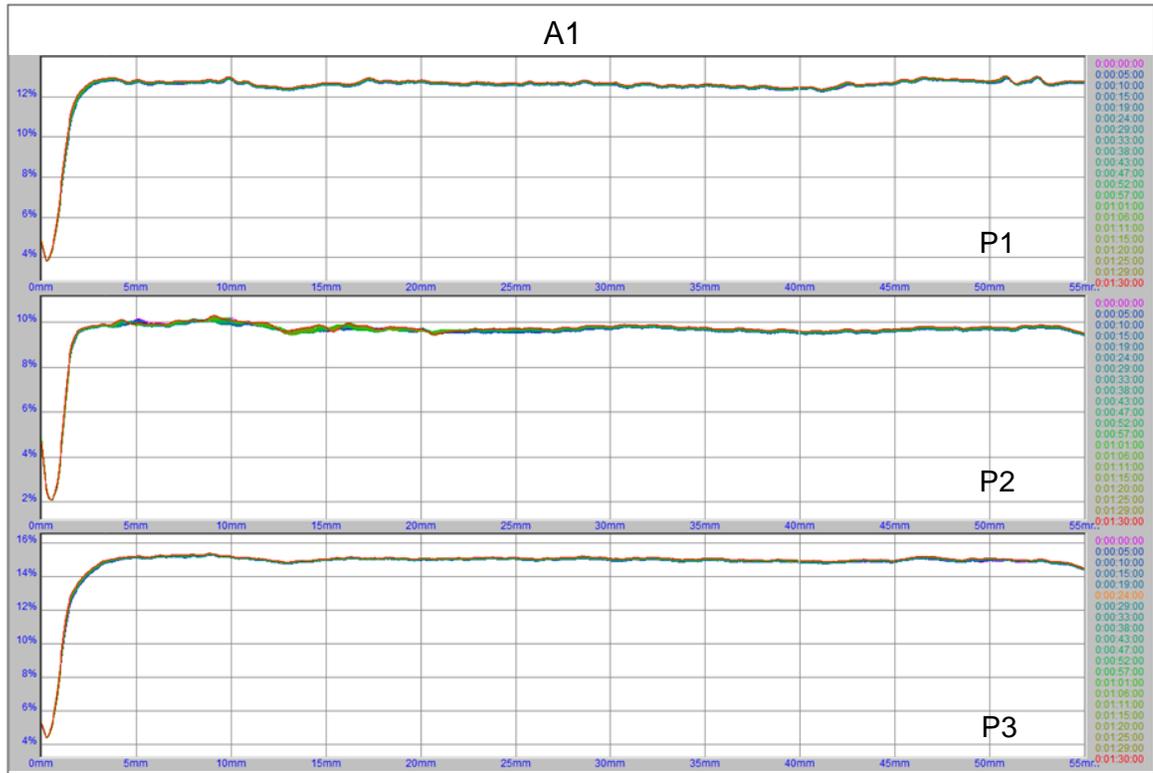


Figura N°43. Curvas de backscattering para aditivo A1

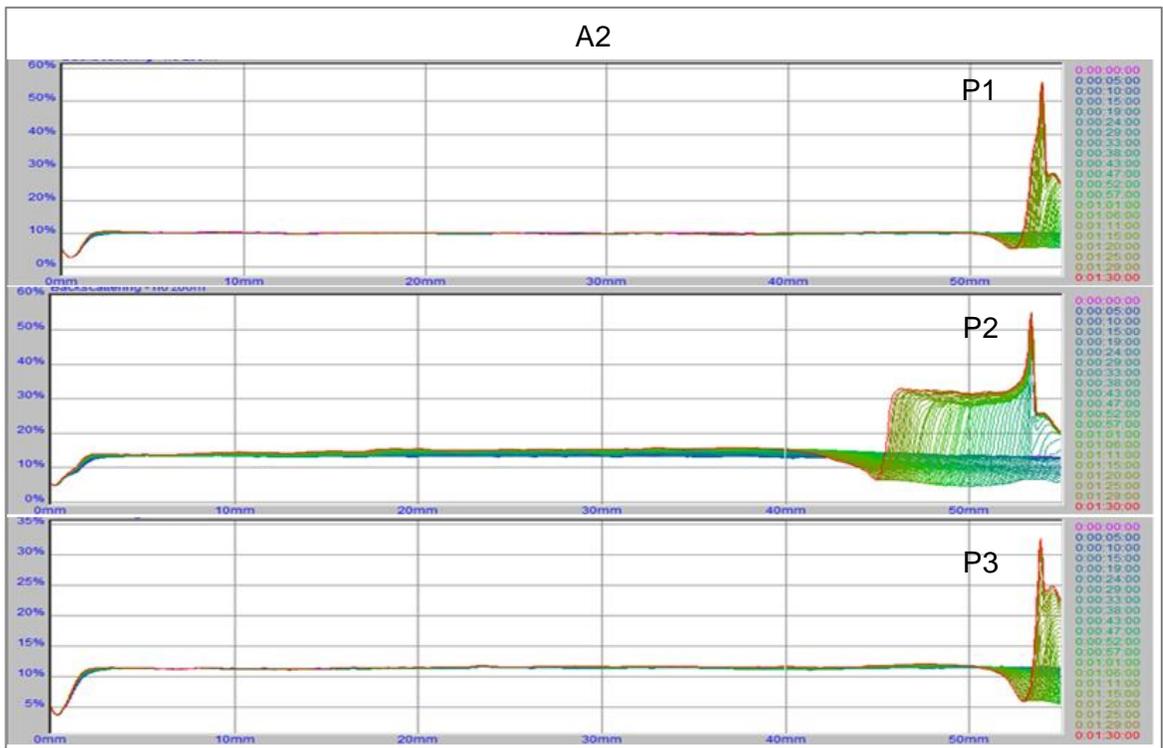


Figura N°44. Curvas de backscattering para aditivo A2

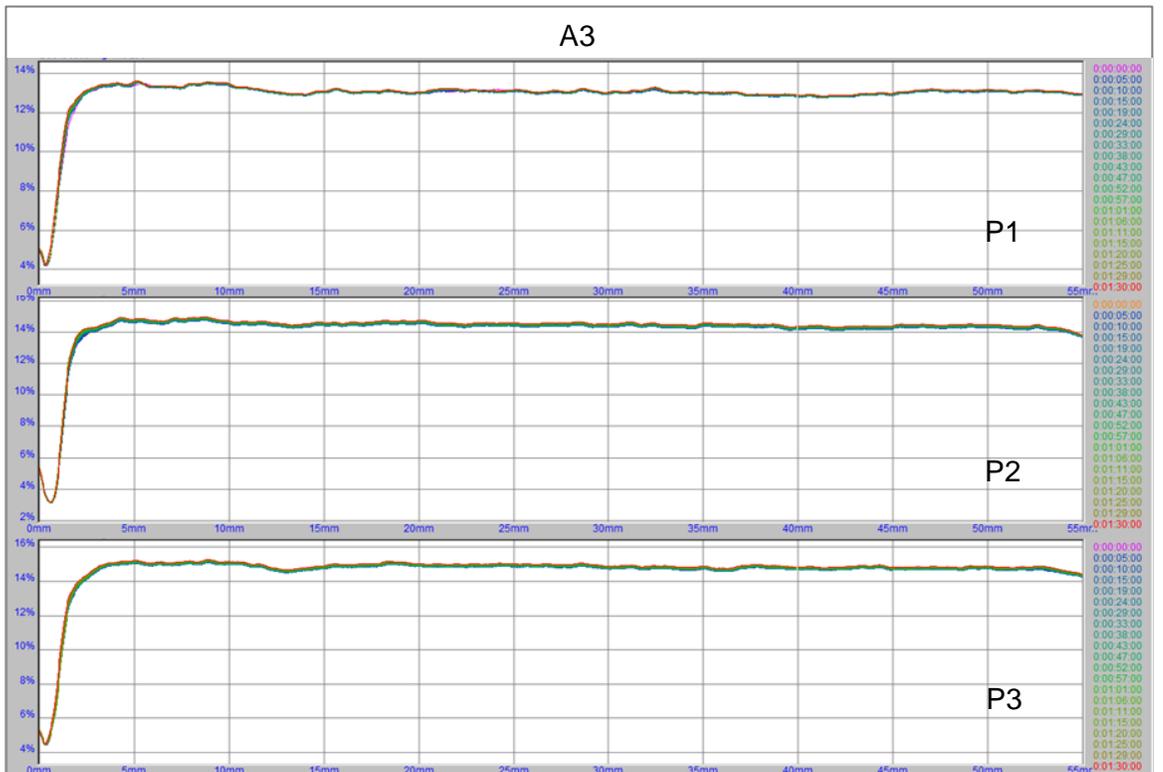


Figura N°45. Curvas de backscattering para aditivo A3

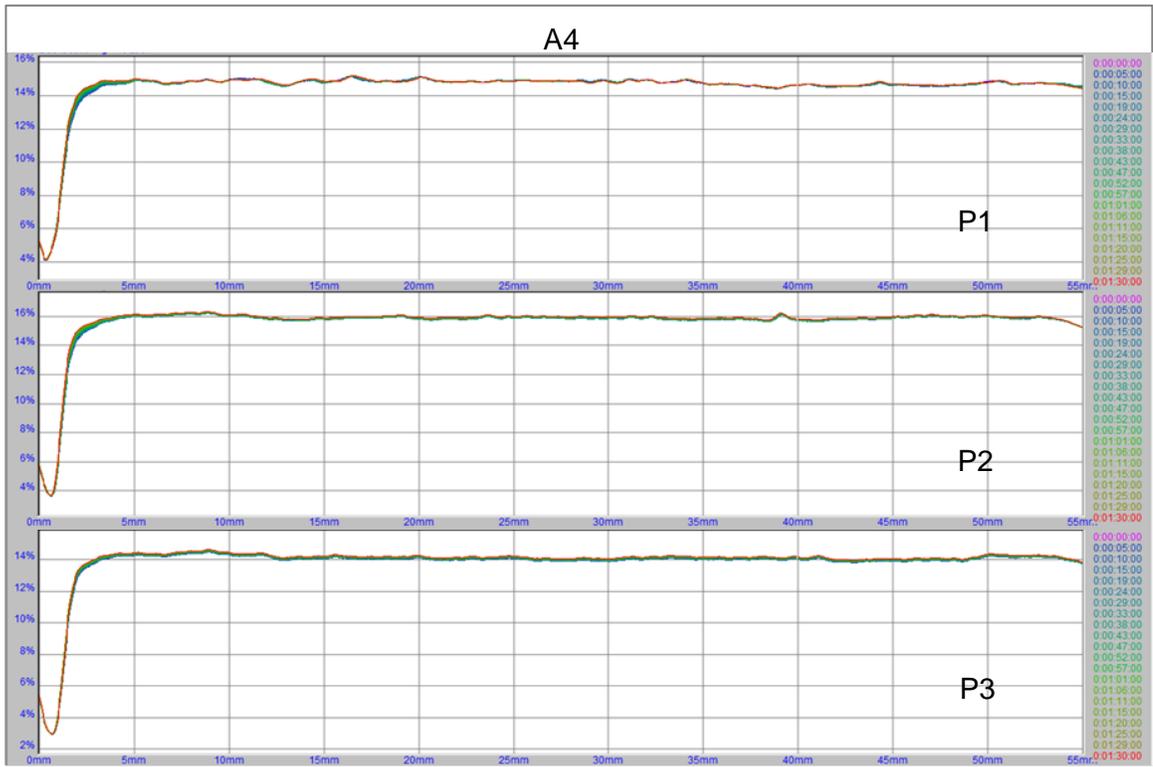


Figura N°46. Curvas de backscattering para aditivo A4

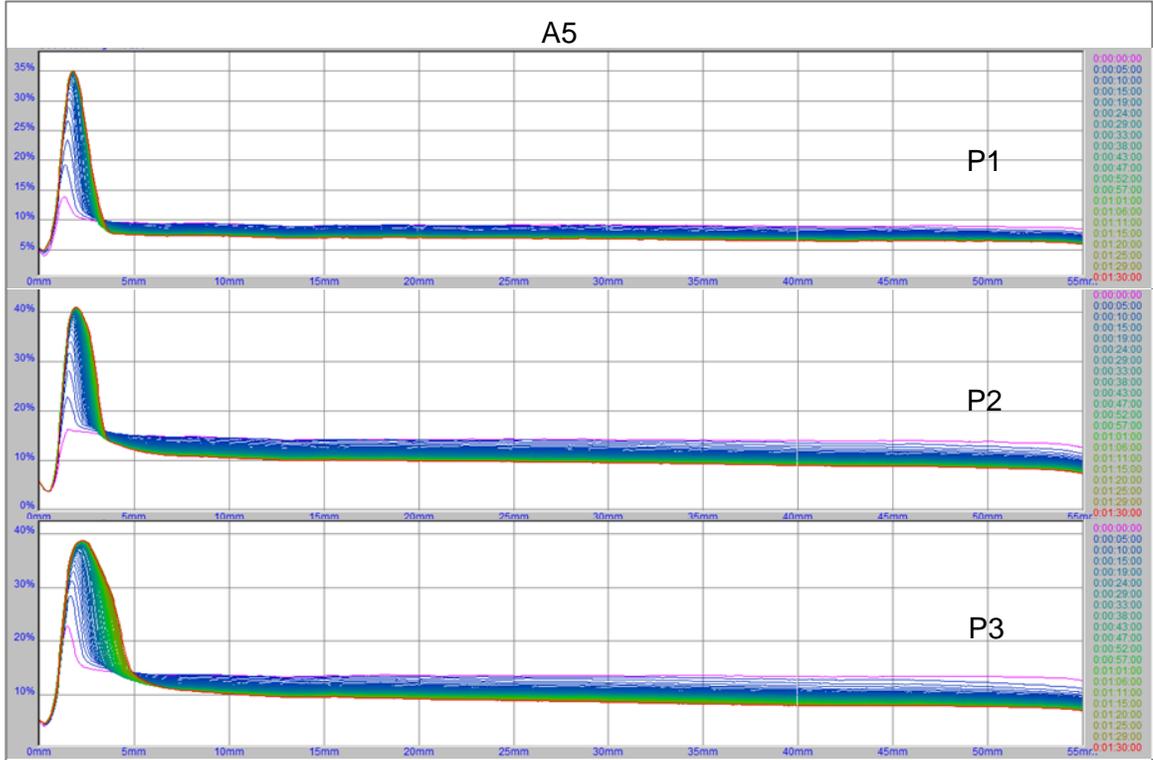


Figura N°47. Curvas de backscattering para aditivo A5

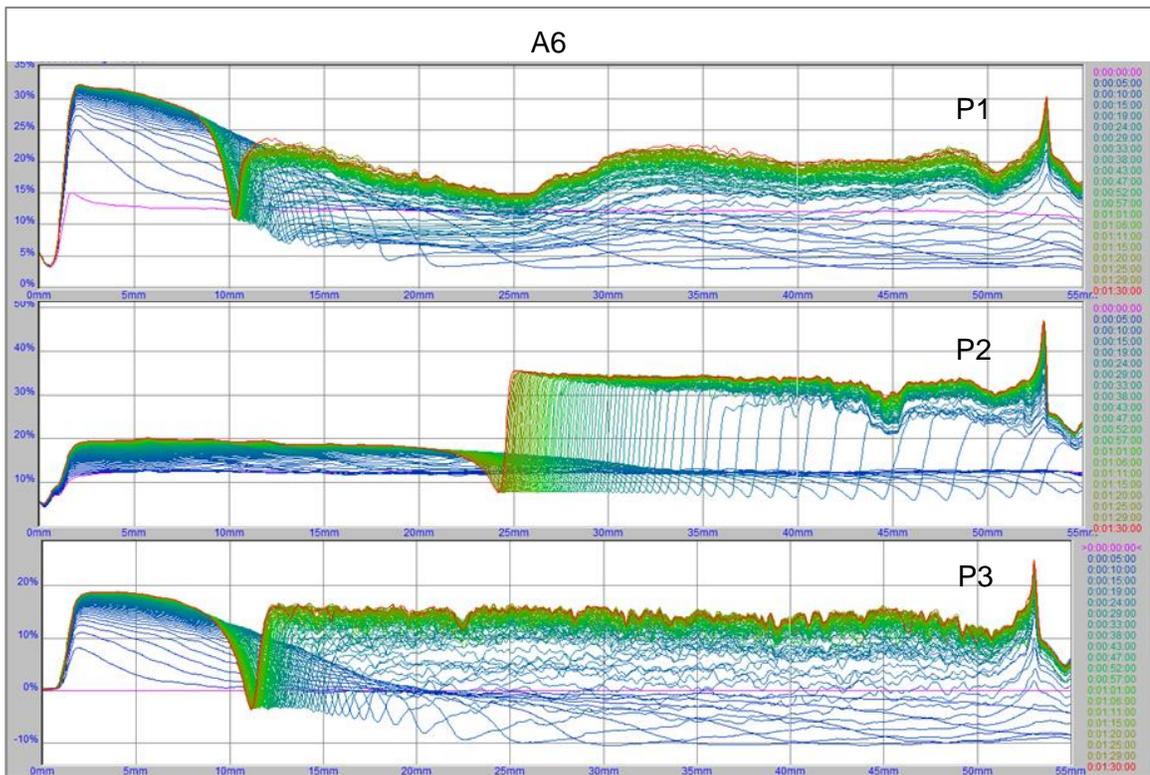


Figura N°48. Curvas de backscattering para aditivo A6

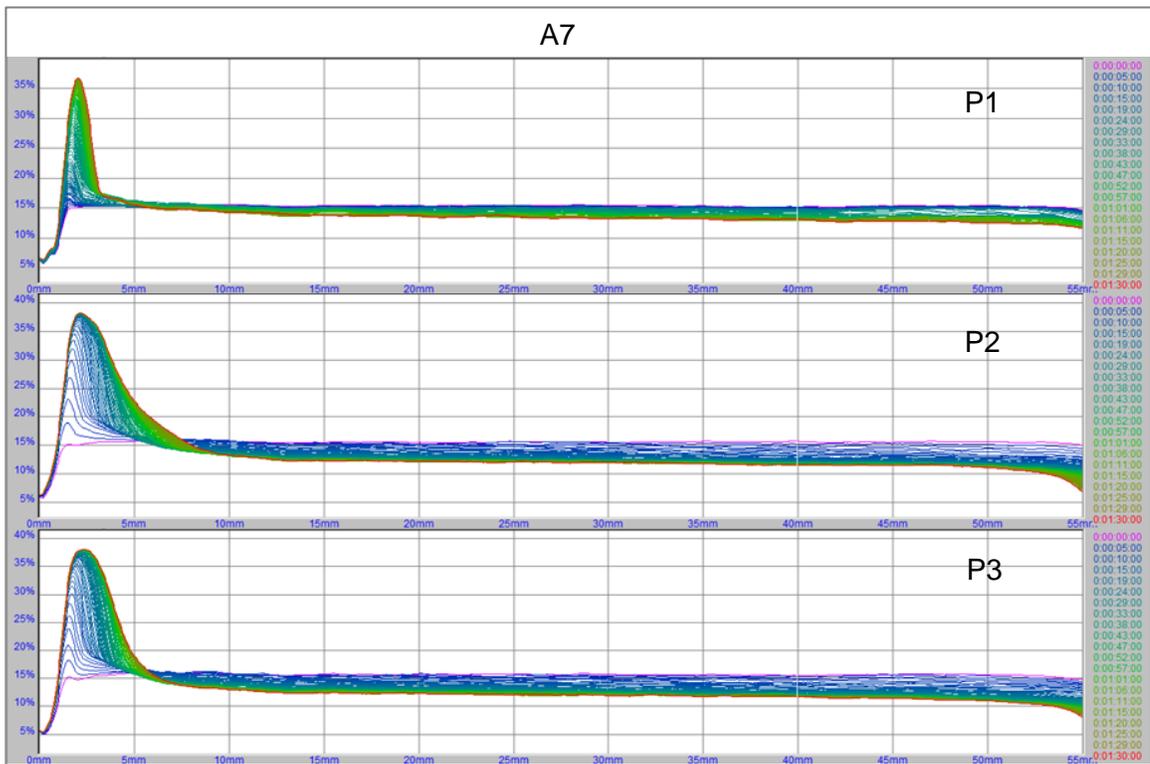


Figura N°49. Curvas de backscattering para aditivo A7

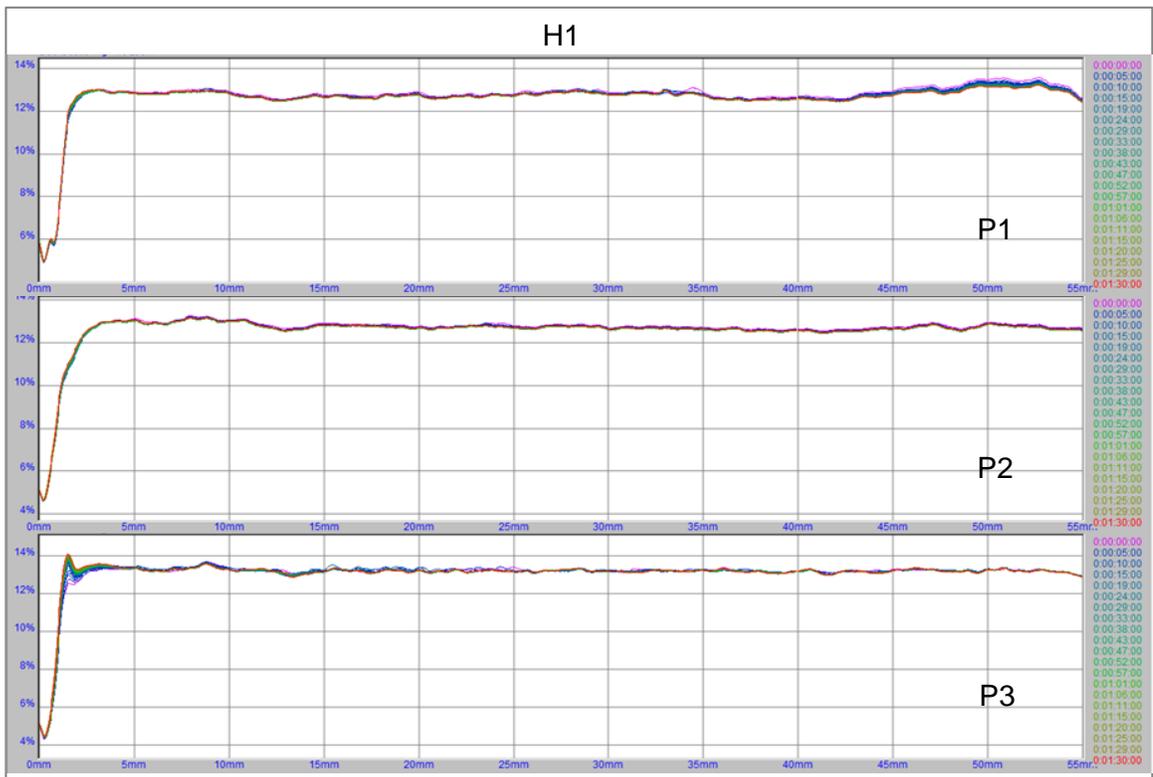


Figura N°50. Curvas de backscattering para aditivo de referencia H1

APÉNDICE C

A continuación se presentan los valores obtenidos de delta de backscattering promedio para las regiones A y B.

Tabla N°22. Valores estadísticos de DBS para la región A

Producto	P1	P2	P3	Promedio	DesvEst
H1	0,02	0,01	0,23	0,09	0,13
A1	0,16	0,05	0,18	0,13	0,07
A2	0,41	0,94	0,26	0,54	0,36
A3	0,16	0,23	0,20	0,20	0,04
A4	0,29	0,23	0,27	0,26	0,03
A5	4,00	6,55	14,64	8,40	5,55
A6	18,35	7,46	18,73	14,85	6,40
A7	6,19	16,24	15,12	12,52	5,51

Tabla N°23. Valores estadísticos de DBS para la región B

Producto	P1	P2	P3	Promedio	DesvEst
H1	-0,21	-0,07	-0,03	-0,10	0,09
A1	0,11	0,10	0,12	0,11	0,01
A2	0,03	7,43	0,27	2,58	4,20
A3	0,07	0,16	0,14	0,12	0,05
A4	0,03	0,06	0,14	0,08	0,06
A5	-2,48	-5,16	-5,52	-4,39	1,66
A6	8,31	20,18	13,73	14,07	5,94
A7	-2,57	-4,11	-4,32	-3,67	0,95

APÉNDICE D

Tabla N°24. Valores de lecturas y desempeño reológico de fluidos formulados a 2 Lpb prueba 1.

Prueba 1									
Antes de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	74	83	45	41	40	42	39	44	43
Lectura 300 rpm	52	50	26	23	23	24	22	24	24
Gel 10 s, lb/100pie²	35	13	5	4	5	4	4	4	4
Gel 10 min, lb/100pie²	46	35	7	5	6	4	6	6	5
Viscosidad Plástica, Cp	22	33	19	18	17	18	17	20	19
Punto Cedente, lb/100pie²	30	17	7	5	6	6	5	4	5
Después de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	131	60	50	53	48	55	54	53	60
Lectura 300 rpm	120	34	27	30	27	31	31	29	33
Gel 10 s, lb/100pie²	114	9	5	6	4	5	7	6	6
Gel 10 min, lb/100pie²	120	16	8	11	5	8	12	20	9
Viscosidad Plástica, cP	11	26	23	23	21	24	23	24	27
Punto Cedente, lb/100pie²	109	8	4	7	6	7	8	5	6

Tabla N°25. Valores de lecturas y desempeño reológico de fluidos formulados a 2 Lpb prueba 2.

Prueba 2									
Antes de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	84	90	41	39	44	38	39	43	39
Lectura 300 rpm	55	59	22	23	25	22	23	24	21
Gel 10 s, lb/100pie²	31	15	4	4	5	4	3	4	3
Gel 10 min, lb/100pie²	50	43	5	5	6	4	4	5	4
Viscosidad Plástica, cP	29	31	19	16	19	16	16	19	18
Punto Cedente, lb/100pie²	26	28	3	7	6	6	7	5	3
Después de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	190	63	45	42	42	38	42	43	46
Lectura 300 rpm	159	42	27	24	25	22	25	27	28
Gel 10 s, lb/100pie²	110	19	5	4	5	4	6	4	7
Gel 10 min, lb/100pie²	130	29	11	4	11	5	15	5	20
Viscosidad Plástica, cP	31	21	18	18	17	16	17	16	18
Punto Cedente, lb/100pie²	128	21	9	6	8	6	8	11	10

Tabla N°26. Valores de lecturas y desempeño reológico de fluidos formulados a 2 Lpb prueba 3.

Prueba 3									
Antes de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	82	89	42	40	43	39	38	45	40
Lectura 300 rpm	55	57	23	23	25	23	23	25	21
Gel 10 s, lb/100pie²	29	15	4	4	5	4	3	5	3
Gel 10 min, lb/100pie²	47	40	5	4	6	5	4	5	3
Viscosidad Plástica, cP	27	32	19	17	18	16	15	20	19
Punto Cedente, lb/100pie²	28	25	4	6	7	7	8	5	2
Después de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	180	62	44	44	43	37	43	43	47
Lectura 300 rpm	130	41	26	24	25	22	25	28	29
Gel 10 s, lb/100pie²	120	17	5	4	4	4	6	3	7
Gel 10 min, lb/100pie²	103	30	10	4	10	5	14	5	20
Viscosidad Plástica, cP	50	21	18	20	18	15	18	15	18
Punto Cedente, lb/100pie²	80	20	8	4	7	7	7	13	11

Tabla N°27. Desviación estándar de lecturas y valores de desempeño reológico de fluidos formulados.

Antes de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	5	4	2	1	2	2	1	1	2
Lectura 300 rpm	2	5	2	0	1	1	1	1	2
Gel 10 s, lb/100pie²	3	1	1	0	0	0	1	1	1
Gel 10 min, lb/100pie²	2	4	1	1	0	1	1	1	1
Viscosidad Plástica, cP	4	1	0	1	1	1	1	1	1
Punto Cedente, lb/100pie²	2	6	2	1	1	1	2	1	2
Después de Envejecer									
Propiedades	Blanco	H1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Lectura 600 rpm	32	2	3	6	3	10	7	6	8
Lectura 300 rpm	20	4	1	3	1	5	3	1	3
Gel 10 s, lb/100pie²	5	5	0	1	1	1	1	2	1
Gel 10 min, lb/100pie²	14	8	2	4	3	2	2	9	6
Viscosidad Plástica, cP	20	3	3	3	2	5	3	5	5
Punto Cedente, lb/100pie²	24	7	3	2	1	1	1	4	3