

**EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE Y
BASE AGUA POR EL USO DE TRES TIPOS DE ADITIVOS LUBRICANTES A
NIVEL DE LABORATORIO**

**ANDRÉS FELIPE FAJARDO VÉLEZ
OSCAR EDUARDO ROJAS QUIMBAYA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2016**

**EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA DEL EFECTO EN LAS PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE Y
BASE AGUA POR EL USO DE TRES TIPOS DE ADITIVOS LUBRICANTES A
NIVEL DE LABORATORIO.**

**ANDRÉS FELIPE FAJARDO VÉLEZ
OSCAR EDUARDO ROJAS QUIMBAYA**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Directora
ALEYDA SANTAMARÍA
Ing. De Petróleos**

**Asesor
WALTER DE JESÚS TOBÓN VÉLEZ
Ing. De Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2016**

Nota de aceptación

Presidente del jurado. WALTER DE JESÚS TOBÓN VÉLEZ

Jurado 1. RAFAEL SIADO

Jurado 2. JUAN CARLOS CASTRO

Agosto de 2016

DIRECTIVAS FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director (E) Programa Ingeniería de Petróleos

Geólogo. EDGAR CEDEÑO LIGARRETO

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento, estos corresponden únicamente a los autores.

A mis padres por haberme permitido llenar mi corta y sutil vida con experiencias que hace veintitrés años habrían sido inimaginables e impredecibles, quienes con su ejemplo, empeño y completa dedicación, me han permitido emprender un conjunto de senderos diversos que poco a poco forjan de mejor manera al hombre que algún día estaré orgulloso de ser.

A mi hermano por haber sido más que participe de este camino, por su comprensión y ayuda, a quién pido disculpas por no ser tan cercano y buen hermano como se debería, pero quién debe tener presente que sin importar las circunstancias siempre estaré ahí para él, con algo de *bullying* por supuesto, pero con la mejor intención y atención cuando lo considere necesario.

A mi compañero de proyecto, por su amistad, empeño y completa dedicación para permitir que este proyecto se llevara a cabo de la mejor manera, por su paciencia, ayuda y buena disposición ante mi peculiar manera de expresar “el disgusto” generado por situaciones de diversa naturaleza; académica y moralmente se convirtió en una persona de confianza, una de las cuantas con quien seguramente podré contar en los tiempos por venir.

A los compañeros encontrados en la universidad a lo largo de la carrera, quienes ‘sin querer queriendo’ dejaron huellas imborrables, amistades intachables e hicieron de esta experiencia un crecimiento continuo y más que agradable que espero seguir cultivando en lo que pudiera quedar de tiempo para cada uno de nosotros.

La vida no tiene una receta para vivirla, y de nuestros errores aprendemos cuan feliz y dolorosa puede ser, sin embargo nada es más perfecto siendo imperfecto que vivir.

A mi padre, que con gran esfuerzo ha dado todo por mí, gracias inconmensurables por tu apoyo, en los días, cuando tuvimos todo y no tuvimos nada; piensa en ti.

A mi madre, ejemplo de dedicación, constancia, y fuerza, gracias por ser una mujer luchadora, frentera e incansable; nunca te rindas.

A mis abuelas Graciela y Marina, que siendo mujeres valientes y trabajadoras, son muestra de amor y dedicación, mi más sentida admiración.

A quien me acompañó en esta locura, Diana, gracias por estar en las buenas y las malas; sé feliz.

A mi compañero, amigo y coautor del presente proyecto, Andrés, con quien sorteamos tantas dificultades y ahora, emprendemos un nuevo camino; nunca permita que nadie le pase por encima.

A aquellos amigos que están y aquellos que no, serán recuerdo insoluble del paso del tiempo y de las decisiones que tomamos.

El amor aparece donde menos lo esperamos de maneras incompresibles e inmensamente hermosas, pero debemos luchar por él, construirlo un día a la vez; a ti gracias por enseñarme que cuando deseamos algo debemos luchar por ello a pesar del miedo, hablando siempre con la verdad.

Promesa cumplida Sophie

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros más sinceros y sentidos agradecimientos a cada una de nuestras familias, quienes con su apoyo, sustento y colaboración hicieron posible la culminación satisfactoria del presente proyecto.

A WEATHERFORD COLOMBIA por habernos abierto sus puertas y permitido el desarrollo del proyecto de grado en sus instalaciones, permitiendo alcanzar más que un requisito de grado, una meta y primeros pasos en el ámbito profesional.

De igual manera a la Ingeniera y directora del proyecto Aleyda Santamaría Cardozo con un sentido reconocimiento por el soporte y colaboración brindados, ya que por medio de su apoyo fue posible el nacimiento, desarrollo y culminación del presente proyecto, además de ser alguien que brindó un aporte constante a nuestro conocimiento.

A la Universidad de América quién brindó el conjunto de profesionales que nos formaron a lo largo de cinco arduos años y que permitieron llegar a este punto, en el cual la integridad de los conocimientos impartidos se pone a prueba, en procura de alcanzar el logro que el presente proyecto de grado representa.

Al Ingeniero Walter de Jesús Tobón Vélez por su colaboración y su tiempo para la revisión y validación de nuestro trabajo de grado, cosa sin la cual, alcanzar los objetivos no hubiese sido posible de manera correcta.

Al Ingeniero Carlos Bernal Vilaro por el soporte técnico, buena actitud y amistad brindada en momentos esenciales de desarrollo profesional así como del presente proyecto.

A nuestros amigos de la Universidad de América por su apoyo, constancia, colaboración y momentos compartidos a lo largo del desarrollo de la carrera, haciendo de la misma una experiencia de vida para no olvidar.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	28
OBJETIVOS	29
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	30
1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	30
1.1.1 Fluido base agua.	31
1.1.1.1 Fluidos dispersos.	33
1.1.1.2 Fluidos no dispersos.	34
1.1.1.3 Fluidos poliméricos.	36
1.1.2 Fluidos base aceite.	36
1.1.2.1 Emulsiones inversas.	36
1.1.2.2 Aceite completamente.	37
1.1.3 Fluidos aireados.	37
1.2 PRUEBAS FÍSICOQUÍMICAS DESARROLLADAS A LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	37
1.2.1 Densidad.	38
1.2.2 Reología.	39
1.2.2.1 Viscosidad Plástica.	41
1.2.2.2 Punto cedente.	42
1.2.2.3 Resistencia al gel.	42
1.2.3 Filtrado estático (Filtrado API).	43
1.2.4 Alcalinidad.	45
1.2.5 Cloruros.	45
1.2.6 Dureza.	46
1.2.7 pH.	47
1.2.8 Lubricidad.	47
1.3 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	49
1.4 ADITIVOS	51
1.4.1 Densificantes.	52
1.4.1.1 Barita.	54
1.4.1.2 Carbonato de Calcio.	55
1.4.2 Viscosificantes.	55
1.4.2.1 Arcillas.	55
1.4.2.2 Polímeros.	56
1.4.3 Controladores de filtrado.	56

1.4.4 Controladores de reología.	57
1.4.5 Controladores de pH.	57
1.4.6 Controladores para pérdida de circulación.	57
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS LUBRICANTES	59
2.1 FUNCIONES DE LOS LUBRICANTE	59
2.2 PRUEBAS A LOS ADITIVOS LUBRICANTES	59
2.2.1 Saponificación.	60
2.3 GENERALIDADES DE LOS TRES TIPOS DE ADITIVOS LUBRICANTES	62
2.3.1 Polímeros.	62
2.3.1.1 Obtención.	64
2.3.1.2 Propiedades.	66
2.3.1.3 Usos.	67
2.3.2 Glicoles.	68
2.3.2.1 Obtención.	68
2.3.2.2 Propiedades.	73
2.3.2.3 Usos.	73
2.3.3 Lubricantes mecánicos.	75
2.3.3.1 Obtención.	75
2.3.3.2 Propiedades.	75
2.3.3.3 Usos.	75
3. PRUEBAS DE LABORATORIO	77
3.1 FORMULACIONES FLUIDOS BASE AGUA	77
3.1.1 Formulación 1.	78
3.1.2 Formulación 2.	78
3.1.3 Formulación 3.	79
3.2 FORMULACIONES FLUIDOS BASE ACEITE	80
3.2.1 Formulación 4.	80
3.2.2 Formulación 5.	80
3.2.3 Formulación 6.	81
3.3 RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO	82
3.3.1 Resultados - Formulación 1.	83
3.3.2 Resultados – Formulación 2.	86
3.3.3 Resultados – Formulación 3.	89
3.3.4 Resultados – Formulación 4.	92
3.3.5 Resultados – Formulación 5.	93
3.3.6 Resultados – Formulación 6.	94
3.3.7 Resultados prueba de saponificación.	95
3.4 MATRIZ DE CONTRASTE	96
3.4.1 Matriz de contraste- Fluidos base agua.	96
3.4.2 Matriz de contraste – Fluidos base aceite.	98

4. EVALUACIÓN DE COSTOS	101
4.1 DETERMINACIÓN DE COSTOS	101
4.1.1 Costos – Formulación 1.	101
4.1.2 Costos – Formulación 2.	103
4.1.3 Costos – Formulación 3.	105
4.1.4 Costos – Formulaciones base aceite.	107
4.1.5 Costos – Aditivos lubricantes.	109
4.2 ANÁLISIS DE COSTOS.	109
4.3 EVALUACIÓN EFICIENCIA – COSTOS.	112
4.3.1 Concentración adecuada – Formulación 1.	112
4.3.2 Concentración adecuada – Formulación 2.	116
4.3.3 Concentración adecuada – Formulación 3.	117
4.3.4 Concentración adecuada – Formulaciones base aceite.	119
5. CONCLUSIONES	121
6. RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	124

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Formulaci3n fluido base agua 13 ppg	78
Tabla 2. Formulaci3n fluido base agua 10 ppg	79
Tabla 3. Formulaci3n fluido base agua 8,5 ppg	79
Tabla 4. Formulaci3n fluido base aceite 13 ppg	80
Tabla 5. Formulaci3n fluido base aceite 10 ppg	81
Tabla 6. Formulaci3n fluido base aceite 8,5 ppg	81
Tabla 7. Reología y densidad para la formulaci3n 1 con glicol	83
Tabla 8. Reología y densidad para la formulaci3n 1 con poliacrilamida	83
Tabla 9. Pruebas Químicas - Formulaci3n 1	84
Tabla 10. Coeficiente de fricci3n con glicol y poliacrilamida - Formulaci3n 1	85
Tabla 11. Coeficiente de fricci3n con esferas de vidrio - Formulaci3n 1	85
Tabla 12. Reología y densidad con glicol - Formulaci3n 2	86
Tabla 13. Reología y densidad con poliacrilamida - Formulaci3n 2	87
Tabla 14. Pruebas químicas - Formulaci3n 2	87
Tabla 15. Coeficiente de fricci3n con glicol y poliacrilamida - Formulaci3n 2	88
Tabla 16. Coeficiente de fricci3n con esferas de vidrio - Formulaci3n 2	88
Tabla 17. Reología y densidad con glicol - Formulaci3n 3	90
Tabla 18. Reología y densidad con poliacrilamida - Formulaci3n 3	90
Tabla 19. Pruebas químicas - Formulaci3n 3	91
Tabla 20. Coeficiente de fricci3n con glicol y poliacrilamida - Formulaci3n 3	91
Tabla 21. Coeficiente de fricci3n con esferas de vidrio - Formulaci3n 3	91
Tabla 22. Lubricidad - Formulaci3n 4	93
Tabla 23. Lubricidad - Formulaci3n 5	93
Tabla 24. Lubricidad - Formulaci3n 6	94
Tabla 25. Matriz de contraste - Fluidos base agua	97
Tabla 26. Matriz de contraste - Fluidos base aceite	99
Tabla 27. Costos de aditivos - Formulaci3n 1	102
Tabla 28. Costos de aditivos - Formulaci3n 2	104
Tabla 29. Costos - Formulaci3n 3	106
Tabla 30. Costos aditivos para las formulaciones base aceite	108
Tabla 31. Costos totales de cada formulaci3n	109
Tabla 32. Costos - Aditivos lubricantes	109
Tabla 33. Costo por dosificaci3n	111

Tabla 34. Costo adicionado con glicol y poliacrilamida	111
Tabla 35. Costo adicionado por las esferas	112
Tabla 36. Relación costo-eficiencia Formulación 1	114
Tabla 37. Relación costo-eficiencia Formulación 2	116
Tabla 38. Relación costo-eficiencia Formulación 3	117
Tabla 39. Incremento en el costo de cada formulación por barril	120

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de controladores de pérdida de circulación	58
Cuadro 2. Propiedades de algunos polímeros comunes	67
Cuadro 3. Usos de algunos polímeros comunes.	68
Cuadro 4. Aditivos seleccionados para fluidos base agua	100

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulación 1	85
Gráfica 2. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulación 2	89
Gráfica 3. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulación 3	92
Gráfica 4. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulaciones base aceite	95
Gráfica 5. Determinación de concentración adecuada - Formulación 1	115
Gráfica 6. Determinación de concentración adecuada - Formulación 2	116
Gráfica 7. Determinación de concentración adecuada - Formulación 3	118

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Viscosímetro de lectura directa	40
Imagen 2. Filtro Prensa API	44
Imagen 3. Lubricímetro	48
Imagen 4. Corrosión de tubería	51

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Viscosidad Plástica	41
Ecuación 2. Punto Cedente	42
Ecuación 3. Concentración de Cloruros	46
Ecuación 4. Concentración de Calcio	47
Ecuación 5. Coeficiente de Fricción	49
Ecuación 6. Aumento de densidad con volumen libre	52
Ecuación 7. Reducción de densidad con volumen libre	53
Ecuación 8. Reducción de densidad a volumen específico	53
Ecuación 9. Aumento de la densidad con volumen específico.	54
Ecuación 10. Hidrolisis de éster en medio acuoso	60
Ecuación 11. Adición del hidroxilo al carbonilo	61
Ecuación 12. Eliminación del metóxido	61
Ecuación 13. Fase inicial polimerización de adición	66
Ecuación 14. Fase final polimerización de adición	66
Ecuación 15. Hidroxilación con tetróxido de osmio	69
Ecuación 16. Hidroxilación con permanganato de potasio	70
Ecuación 17. Hidroxilación con ácido peroxifórmico	70
Ecuación 18. Formación de un epóxido	71
Ecuación 19. Formación de glicol a partir de un epóxido	71
Ecuación 20. Formación de glicol a partir de un epóxido.	72
Ecuación 21. Dosificación de aditivo cada 0,5%	110
Ecuación 22. Porcentaje de la propiedad inicial	113
Ecuación 23. Porcentaje máximo de aporte al fluido de perforación	113
Ecuación 24. Función del porcentaje de la propiedad inicial respecto a la concentración - Formulación 1	115
Ecuación 25. Función del máximo aporte respecto a la concentración - Formulación 1	115
Ecuación 26. Función del porcentaje de la propiedad inicial respecto a la concentración - Formulación 2	117
Ecuación 27. Función del máximo aporte respecto a la concentración - Formulación 2	117
Ecuación 28. Función del porcentaje de la propiedad inicial respecto a la concentración - Formulación 3	118

Ecuación 29. Función del máximo aporte respecto a la concentración -
Formulación 3

118

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación general de los fluidos de perforación	32
Figura 2. Emulsión inversa	36
Figura 3. Balanza de lodos	38
Figura 4. Viscosímetro de lectura directa.	40
Figura 5. Filtro prensa API	43
Figura 6. Estructura de polímero lineal	63
Figura 7. Estructura de polímero ramificado	63
Figura 8. Estructura de polímero entrecruzado	63
Figura 9. Estructura de homopolímero	63
Figura 10. Estructura de copolímero	64
Figura 11. Mecanismo de reacción S_N2	65

GLOSARIO

ADHESIÓN: propiedad presentada entre dos sustancias, las cuales se encuentran en contacto y cuyas superficies se unen, dicho fenómeno se puede dar de forma mecánica haciendo énfasis en el relleno de los espacios porosos de un material (material sólido) o de forma química mediante la interacción de las moléculas de las diferentes sustancias las cuales al ser afines pueden dar lugar a enlaces iónicos (transferencia de electrones) o covalentes (se comparten electrones) que den mayor estabilidad y permitan la interacción entre las superficies afectando directamente la adherencia.

ADITIVOS: sustancias químicas que modifican las características físico-químicas de una mezcla fluida con el fin de hacer de esta, óptima de acuerdo a los requerimientos presentados por una formación a perforar.

ALCALINIDAD: concentración de iones de carbonato, hidroxilo y/o bicarbonato capaces de neutralizar ácidos presentes en una solución.

ARRASTRE: esfuerzo mecánico presentado por la relación entre la sarta y el fluido de perforación que da lugar a un detenimiento representado por la disminución en la aceleración que llevara la tubería así como un aumento en la energía de los motores de superficie que deben vencer los esfuerzos generados y así continuar con las operaciones de perforación.

COEFICIENTE DE FRICCIÓN: también conocido como COF por sus siglas en inglés, hace referencia a una medida adimensional referente al grado de resistencia al movimiento presente entre dos elementos que se deslizan uno contra otro. Para fluidos de perforación base agua su valor es igual o mayor a 0,2, mientras que para fluidos base aceite su valor se considera menor a 0,1.

COHESIÓN: fuerza de atracción presente entre las moléculas de una sustancia que permite a las mismas formar lazos y dar estabilidad a la sustancia misma. Ejemplo de ello se evidencia en el agua, la cual debido a la formación de puentes de hidrógeno entre sus moléculas hace que se formen lazos que requieren de una alta energía para ser alterados.

DENSIDAD: cantidad de masa en volumen determinado de fluido expresado en libras por galón, gramo por centímetro cúbico kilogramo por metro cubico u otras unidades según sea requerido.

DUREZA: conglomerado de sales disueltas de calcio o magnesio en el agua de mezcla o el fluido de perforación en sí mismo, contribuyen en grandes cantidades a problemas tales como las incrustaciones en la sarta de perforación.

FILTRADO: líquido que atraviesa un medio poroso dado un diferencial de presión durante el proceso de filtración.

FLUIDO DE PERFORACIÓN: fluido que consta de una fase continua (agua, crudo, aire o gas) capaz de dar sostén a los sólidos o líquidos presentes en la mezcla, una fase dispersa encargada de brindar viscosidad y resistencia gel a la mezcla, sólidos inertes deseables (bentonita) o indeseables (aportes de formación) que se presentan a medida del desarrollo de la operación y por último un conglomerado denominado fase química el cual hace referencia al conjunto de aditivos adicionales que dan soporte y control a las demás necesidades dadas en las operaciones de perforación, ejemplo de ello son los inhibidores/controladores de arcilla, aditivos poliméricos, lubricantes y otros de interés que son escogidos de acuerdo a las necesidades presentadas por las formaciones a ser perforadas durante las diversas operaciones de perforación de un pozo.

FRICCIÓN: fuerza opuesta al movimiento de un cuerpo, debida a la falta de integridad y homogeneidad en la superficie sobre la cual el cuerpo desarrolla su movimiento. Se pueden determinar dos tipos tales como la fricción estática y la fricción dinámica, asociadas a los estados de reposo que presenta un cuerpo y así como el movimiento y los conjuntos de esfuerzos que actúan sobre el mismo.

GOMA XANTANO: aditivo que consiste en un polisacárido el cual al disolverse otorga viscosidad al fluido, brindando propiedades reológicas al mismo y presentando una estabilidad dependiente del pH y la concentración de iones disueltos.

GLICOL: compuestos químicos en cuya composición se presentan dos grupos hidroxilo. Los glicoles de alto peso molecular son empleados en la industria de los lubricantes y los productos cosméticos. El compuesto de mayor uso es el etilenglicol, sustancia asociada como estabilizador de congelación y reducción del punto de congelación cuando se encuentra en solución.

GRUPO FUNCIONAL: átomo o conjunto de átomos que se encuentran unidos a una cadena carbonada y le otorgan las propiedades fisicoquímicas y la reactividad al compuesto orgánico.

GRUPO SALIENTE: conjunto de átomos que son retirados de un compuesto por efecto de una sustitución nucleofílica, depende de la naturaleza y capacidad del átomo para reacomodar las cargas, entre menor sea su basicidad mejor grupo saliente es, ejemplo de ello pueden ser los halógenos. Dicha basicidad se encuentra en función del factor pK_b y este a la vez de la constante de equilibrio K_b proveniente del desplazamiento del equilibrio ácido-base, entre mayor sea el valor de pK_b mayor es la basicidad.

HIDROXILO: grupo funcional compuesto de un átomo de hidrógeno y uno de oxígeno con una valencia negativa equivalente a un electrón, el cual es normalmente unido a una cadena de hidrocarburos.

LIGNITO: roca sedimentaria de coloración oscura (negro) y textura rugosa a manera de trocos/leños, cuya generación proviene del depósito de restos vegetales tales como plantas y residuos de las mismas, en principio se le

considera turba pero por efectos de compactación y condiciones de subsuelo pierden parte del hidrógeno, oxígeno y nitrógeno de su composición, permitiendo que el porcentaje de carbono en los restos aumente considerablemente y de lugar a la roca misma. Es de gran utilidad en la industria de los hidrocarburos siendo este un aditivo esencial para los fluidos de perforación base agua, proveyendo propiedades de control reológico así como la reducción del filtrado hacia la formación principalmente, debido a sus características y desarrollos en la industria resulta ser un compuesto estable a altas temperaturas (hasta 350°F) y eficaz independiente del tipo de agua base empleada para la generación del fluido de perforación (agua dulce o salada).

LUBRICANTE: aditivo agregado a los fluidos de perforación con el fin de reducir los esfuerzos de torsión y/o arrastre durante las operaciones de perforación; estos a su vez pueden ser sólidos como las esferas de vidrio y el grafito, o fluidos tal como los polímeros, aceites, glicoles u otras sustancias.

LUBRICIDAD: pruebas desarrolladas a los fluidos de perforación en que se simulan las condiciones de torque y arrastre generados en un pozo, tiene como referente el coeficiente de fricción a partir del cual se determina cuan óptima pueda llegar a ser dicha propiedad.

NUCLEÓFILO: conjunto de átomos que atacan al grupo saliente, desplazándolo y aferrándose al carbono polarizado positivamente, el cual posee una naturaleza electrófila aceptando los electrones del nucleófilo y brindando al mismo una nueva naturaleza electrófila que permite dar lugar a la sustitución misma.

PERMEABILIDAD: propiedad intrínseca de la roca que permite el paso de fluidos a través de la misma, dicho movimiento se encuentra ligado al diferencial de presión entre dos puntos los cuales lideran el desplazamiento de los fluidos de un punto a otro.

PLASTICIDAD: propiedad física de los cuerpos sólidos de deformarse sin alcanzar su punto de fractura. Los cuerpos rocosos presentan dicha propiedad, pues al estar sujetos a esfuerzos de compresión, cizallamiento y/o tensión dan lugar a una deformación; las arcillas debido a su capacidad para absorber agua resultan en un hinchamiento que facilita la deformación al someter el cuerpo rocoso a esfuerzos, claro está que depende de la disposición de los granos así como el tamaño de los mismos.

POLIACRILAMIDA: polímero de alto peso molecular, de fórmula $(C_3H_5NO)_n$, ampliamente usado en la industria por su caracterización química inerte así como alta fuerza iónica que entre muchos de los usos promueve la floculación de los sólidos presentes en el fluido en sí mismo.

POROSIDAD: medida del porcentaje de volumen poroso que posee una roca independientemente de la interconexión que tengan los poros de la misma. La porosidad puede clasificarse como efectiva y no efectiva, la primera hace mención del conjunto de poros interconectados entre sí y sobre los cuales podrá actuarse

en procura de la obtención de fluidos que allí residen, la segunda se focaliza en el conjunto de poros aislados en los cuales puede encontrarse un volumen de fluido no extraíble por los medios convencionales. De igual manera la porosidad se puede clasificar como primaria es decir, aquella intrínseca desde la formación de la roca y la secundaria aquella relacionada con los poros o espacios generados por la acción de esfuerzos, contacto con agua, acidificaciones, fracturas o cualquier otro evento posterior a la formación de la roca.

PUNTO CEDENTE: resistencia al flujo presentada por un fluido, debido a la relación de las cargas eléctricas tenidas por las superficies de los sólidos en suspensión, por lo tanto su valor está directamente relacionado con el tipo y concentración de sólidos así como la naturaleza iónica de los elementos.

REOLOGÍA: comprende el conjunto de fuerzas presentes en el fluido de perforación cuando el mismo se encuentra en movimiento, así como el comportamiento de los sólidos que son llevados en suspensión y su respectiva relación con las fuerzas de gel que permiten el acarreamiento de dichos elementos. Se descompone y evalúa a partir de tres parámetros tales como la viscosidad aparente, la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

REVOQUE: conjunto de sólidos adheridos al medio poroso durante el proceso de filtración.

RIPIOS: conjunto de fracciones de roca presentadas durante la perforación, se generan por la fricción y movimiento de la broca contra los cuerpos rocosos del subsuelo. Son de vital importancia como elemento de control y corroboración litológica de los registros eléctricos obtenidos de pozos aledaños con los cuales supervisar el desempeño de las operaciones.

SAPONIFICACIÓN: conjunto de reacciones de químicas en la que se desarrolla una generación de espuma debido a la disociación de componentes grasos en un medio básico (pH mayor a 7), donde la separación de componentes abre la brecha entre la glicerina y los ácidos grasos, estos últimos asociados al medio alcalino fuerte permiten la creación de sales de sodio o carbonatos y por ende dan lugar a la espuma asociada al proceso (generación de jabón).

SULFONATO: grupo funcional SO_3^- normalmente unido a una cadena carbonada a la que se denomina radical (R), su obtención puede provenir de la interacción entre los cloruros de sulfonilo y los alcoholes dando lugar a sulfonatos de alquilo, agua y iones de cloruro libres.

TASA DE PENETRACIÓN: velocidad con que la broca profundiza el pozo perforando sobre las formaciones en procura de alcanzar la zona de interés.

TORQUE: fuerza generada desde la mesa rotaria o *Top Drive* capaz de hacer rotar la sarta de perforación, profundizar y llevar a cabo las operaciones de perforación.

TORSIÓN: esfuerzo generado en dirección contraria al torque que da lugar a problemas de perforación.

TRIBOLOGÍA: conjunto de desarrollos científicos y tecnológicos encaminados al estudio de tres aspectos asociados a los cuerpos cuando estos son sometidos a esfuerzos tales como la lubricación, la fricción y el desgaste, aspectos de gran importancia pues a partir de ellos se podrá tener una concepción referente a la vida útil de herramientas, equipos y sarta de perforación.

VISCOSIDAD APARENTE: parámetro reológico obtenido por la medición del reómetro a 600 rpm dividido en dos (2).

VISCOSIDAD PLÁSTICA: medida de la resistencia al flujo debido a la fricción de los sólidos en suspensión en relación al medio fluido que les circunda. Su valor se obtiene por la medición del reómetro a 600 rpm menos la medición a 300 rpm.

VISCOSIDAD: medida de la resistencia al flujo presentada por un fluido. Se expresa en términos del tiempo estándar requerido por una cantidad de fluido a unas condiciones de presión y temperatura determinada para atravesar un orificio de características establecidas de acuerdo a las normas.

LISTA DE ABREVIATURAS

% V/V	Porcentaje volumen a volumen
°C	Grado Celsius, unidad de temperatura
°F	Grado Fahrenheit, unidad de temperatura
AgNO ₃	Nitrato de plata
API	American Petroleum Institute
Bbl	Barril
Ca ²⁺	Ion calcio
Ca ₂ CO ₃	Carbonato de Calcio
CaCl ₂	Cloruro de calcio
CH ₃ O ⁻	Ion metóxido
CH ₃ OH	Metanol
Cl ⁻	Ion cloruro
cm ³	Centímetro cubico
CMC	Carboximetilcelulosa
CO ₂	Dióxido de carbono
COP	Peso colombiano
cP	centiPoise
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
ft ²	Pie cuadrado
gal	Galón
H ₂ O	Agua
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₃ CCOO ⁻	Ion etanoato
H ₃ CCOOCH ₃	Etanoato de metilo
H ₃ CCOOH	Ácido acético
H ₃ O ⁺	Ion hidronio
H _s S	Ácido sulfhídrico
K ₂ CrO ₄	Cromato de potasio
KCl	Cloruro de potasio

lb	Libra
LWD	Logging while drilling
m	Masa
M	Molaridad, unidad de concentración
mL	Mililitro
MWD	Measurement while drilling
N	Normalidad, unidad de concentración
NaCl	Cloruro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
NH ₃	Amoníaco
NH ₄ ⁺	Ion amonio
OH ⁻	Ion hidroxilo
OsO ₄	Tetróxido de osmio
pH	Potencial de hidrogeno
ppg	Pound per gallon – Libra por galón
R ₃₀₀	Lectura del viscosímetro de lectura directa a 300 RPM
R ₆₀₀	Lectura del viscosímetro de lectura directa a 600 RPM
ROP	Rate of penetration – Velocidad de perforación
S _{N2}	Sustitución nucleofílica bimolecular
USD	Dólar americano
YP	Yield point – Punto cedente
γ	Gravedad específica
η_{VP}	Viscosidad plástica, cP
μ	Coefficiente de fricción
ρ	Densidad

RESUMEN

El presente proyecto de grado tiene por objeto desarrollar, la evaluación del efecto en las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación base agua y base aceite de tres aditivos lubricantes, para tal fin parte de la descripción de los fundamentos teóricos de los fluidos de perforación en cuanto a clasificación, funciones y pruebas aplicadas a los mismos, con un apartado especial para la prueba de lubricidad, la anterior como propiedad fundamental a evaluar en el presente proyecto; Adicionalmente la descripción de los aditivos más utilizados en el área de fluidos de perforación de acuerdo a su función y los exponentes más comunes de los mismos.

Posteriormente la descripción de los fundamentos de los tres aditivos lubricantes evaluados (poliacrilamida, glicol y esferas de vidrio) en cuanto a sus funciones, obtención, propiedades y usos en la industria en general, además de la prueba de saponificación, evaluando con ello la generación de espuma y las consecuencias que esta puede tener.

De igual manera se presenta las formulaciones de los fluidos de perforación evaluados, con sus respectivas dosificaciones, presentando con ello los resultados del cambio de concentración de cada aditivo sobre cada formulación, con el respectivo análisis, lo cual, al ser unido a la evaluación ya realizada, mediante una matriz de contraste para cada base; da lugar a que aditivo es el más conveniente según la densidad de la formulación.

En la parte final se evalúa el costo de preparación de cada formulación por barril, un análisis del costo que aporta la dosificación de cada aditivo al barril de fluido y finalmente la comparación entre la eficiencia en la reducción del coeficiente de fricción a medida que se aumenta la concentración del aditivo más adecuado y el costo que se incrementa en el barril, para así determinar la concentración que presenta una mayor reducción de la propiedad acarreado un menor costo.

Palabras Clave: Fluido de perforación, aditivo lubricante, glicol, poliacrilamida, esferas de vidrio

INTRODUCCIÓN

En la industria de los hidrocarburos, la perforación desempeña una de las operaciones de mayor relevancia, ya que mediante su planeación y desarrollo es posible confirmar la presencia del petróleo crudo; y con ello ser base de una industria cambiante y rentable como lo es, la de los hidrocarburos. Como parte de esta operación el área de fluidos de perforación juega un papel vital, puesto que permite llevar a cabo de manera segura y eficaz las operaciones. En procura de mejorar las propiedades de los fluidos de perforación, entre ellas la lubricación se propende por el uso de aditivos lubricantes, que permitan la disminución del coeficiente de fricción haciendo a la mezcla idónea para condiciones rigurosas y de alta demanda en cuanto a esfuerzos. Y debido a la multiplicidad de productos ofrecidos en la industria el presente proyecto tiene por objeto determinar el efecto en las propiedades fisicoquímicas de fluidos base agua y base aceite por el uso de tres tipos de aditivos lubricantes tales como la poliacrilamida, el glicol y las esferas de vidrio, los cuales son usados con otros fines, pero, para el presente proyecto develan usos fuera de lo cotidiano de la industria.

Lo anterior, en principio se logra a partir de una descripción teórica de los fluidos de perforación, los aditivos y pruebas comúnmente desarrolladas a los mismos, así como generalidades relacionadas con los aditivos lubricantes empleados; La lubricidad como propiedad de especial atención en el presente proyecto, la cual comúnmente es poco estudiada y descrita, para los fluidos de perforación; se abarca a partir del cambio del valor del coeficiente de fricción, conforme se varia la concentración de cada aditivo lubricante. Todo lo anterior para lograr una propuesta acerca de la concentración más eficiente, con una adición de costo lo menos significativa por cada barril de fluido utilizado, para la industria representa la oportunidad de evaluar de manera más rápida una elección de aditivo lubricante en una dosificación técnicamente sustentada, de igual manera se valoran y establecen las propiedades químicas de los fluidos tales como la alcalinidad del filtrado, dureza total, pH y la concentración de cloruros mostrando con ello, el comportamiento de los fluidos base posterior a la dosificación del respectivo aditivo; Lo anterior dando lugar al desarrollo de un análisis específico de los efectos, asociado a una matriz de contraste que pone en evidencia los aditivos más eficientes de acuerdo a la experimentación desarrollada, luego a partir de un análisis de costos que tiene como base los resultados obtenidos del presente proyecto sumado a los costos de cada uno de los fluidos propuestos en el mismo, se permite el desarrollo de una evaluación costos-eficiencia que permite el establecimiento de la concentración más adecuada desde el punto de vista experimental de los aditivos, con el fin de dar un muestra algunas de las posibles escogencias en que se puede incurrir a la hora del desarrollo de un proyecto a gran escala y en el que puedan ser requeridos aditivos de naturaleza lubricante.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y financieramente el efecto en las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación base aceite y base agua por el uso de tres tipos de aditivos lubricantes a nivel de laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los fundamentos teóricos para los fluidos de perforación y los tres tipos de aditivos lubricantes.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los aditivos lubricantes mediante pruebas de laboratorio.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de prueba base agua y base aceite mediante pruebas de laboratorio conforme a la norma API RP 13B.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de prueba una vez adicionado el aditivo lubricante mediante pruebas de laboratorio conforme a la norma API RP 13B.
- Comparar el posible cambio de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de prueba de acuerdo a la concentración del aditivo lubricante usado mediante una matriz de contraste.
- Evaluar la viabilidad financiera de los aditivos lubricantes en fluidos de perforación mediante un análisis de costos.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación son una mezcla fluida de sustancias líquidas y sólidas denominadas aditivos, los cuales tendrán por objeto llevar a cabo diversas funciones en las operaciones de perforación, estos fluyen a través de los diferentes componentes del sistema de circulación, brindando las condiciones físico-químicas óptimas y operacionales para la perforación de los diferentes estratos del subsuelo. A ello se suman características como nula toxicidad, inflamabilidad y corrosión que garanticen las buenas prácticas y desarrollos de las operaciones durante la manipulación de los fluidos. Dentro de su composición se ponen en evidencia cuatro componentes generales tales como la fase continua, haciendo referencia a aquella encontrada en mayor medida, capaz de dar sostén a las sustancias adicionadas a la mezcla y así brindar el medio fluido la capacidad de cumplir las funciones del fluido de perforación, la fase dispersa la cual corresponde según el manual de fluidos de Baroid¹ al conjunto de aditivos encargados de brindar densidad y/o viscosidad a la mixtura, siendo la barita y la bentonita algunos de los más convencionales.

Los sólidos inertes que se pueden clasificar en deseables e indeseables, los primeros refieren a aquellos adicionados por los especialistas en el desarrollo del fluido, los segundos se componen del conjunto de ripios y elementos encontrados a medida que se procede con las operaciones de perforación, como su nombre lo indica, estos no reaccionan químicamente con los componentes de la mezcla más sin embargo si resultan ser un factor determinante en las propiedades físicas de la misma, implicando cambios/alteraciones que pudieran liderar a problemáticas de mayor envergadura.

Por último se encuentra la fase química dentro de la cual se ven expuestos los aditivos encaminados a prevenir alguna de las problemáticas presentadas durante el proceso de perforación, ejemplo de ello son los controladores de arcilla, algunos de los cuales interactúan iónicamente con el medio circundante generando una película capaz de dar sostén y prevenir el hinchamiento de las mismas, al reducir la interfaz de contacto entre el agua y la roca en sí misma, de igual modo se encuentran los controladores de filtrado, aditivos poliméricos y/o cualquier otro aditivo que altere la naturaleza química de la mixtura.

1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Como fue mencionado previamente una de las características de los fluidos corresponde a las fase continua en que fueron desarrollados, a continuación se da lugar a una explicación encaminada a presentar algunas de las diferentes

¹ BAROID. Manual De Fluidos. Houston, USA:s.n. ,1977. Cap. 4. p. 16-4

opciones tenidas de acuerdo a las necesidades operacionales y/o económicas que se presentan en las operaciones de perforación, así como un cuadro de clasificación general que desglose a los fluidos de perforación(Ver Figura 1)

1.1.1 Fluido base agua. Se compone principalmente de agua en el papel de fase continua, la cual está normalmente acompañada de bentonita, en su configuración más básica llega a conocerse como fluido bentonítico o de inicio, como su nombre lo indica es usado para las fases más superficiales de la perforación en un pozo, debido a la posible presencia de aceite siendo el mismo petróleo crudo se habla de la formación de una emulsión de agua en aceite durante las operaciones de perforación, ya que debido a las condiciones turbulentas y algunos agentes químicos emulsificantes se da lugar a dicha mezcla de los fluidos naturalmente inmiscibles.

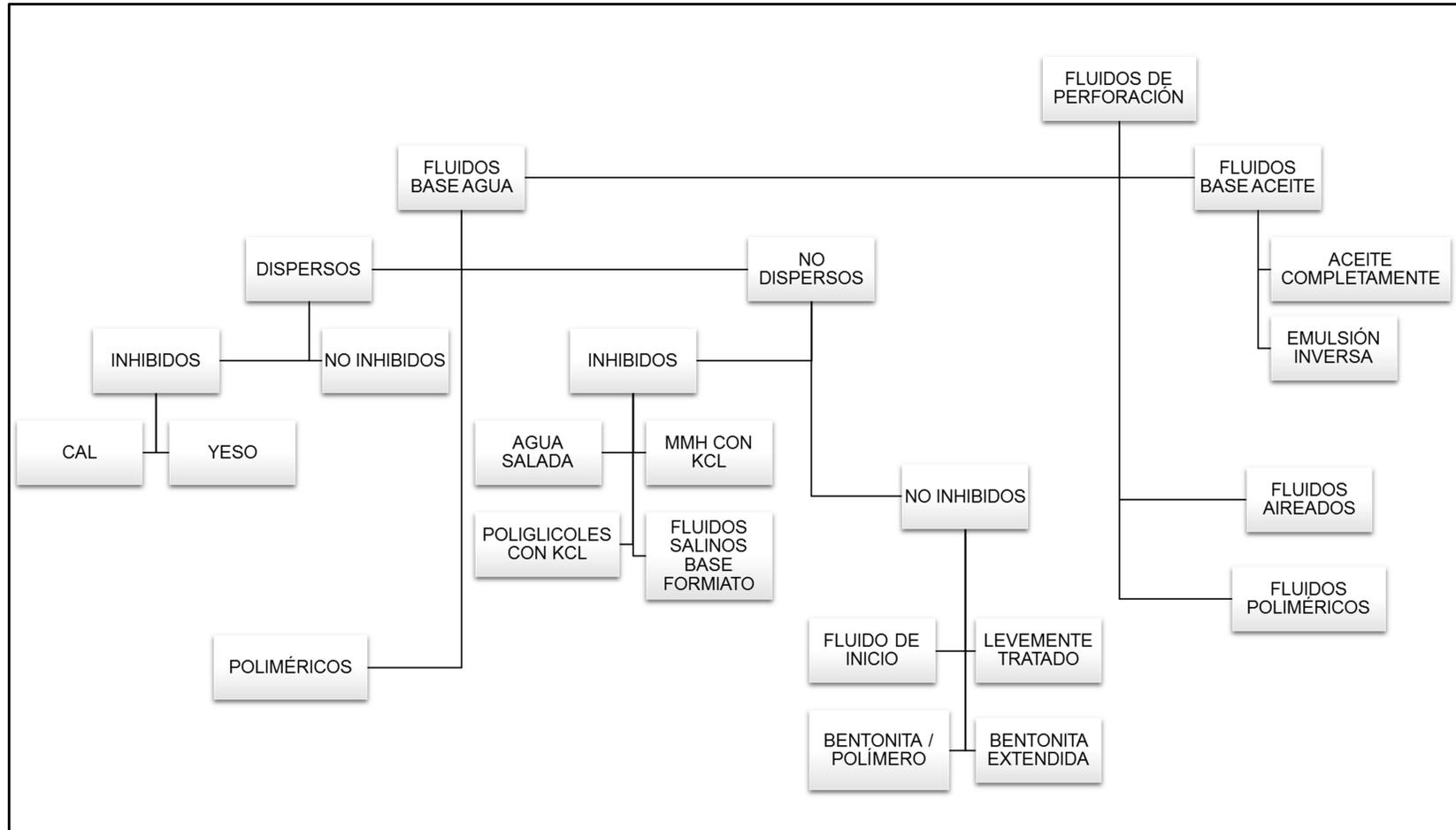
El agua empleada también puede ser agua de mar de acuerdo a la disponibilidad o necesidad presente en la operación, con frecuencia se emplean también aditivos como poliacrilamida, carboximetilcelulosa (CMC), bentonita, barita o carbonato de calcio, lignitos, lignosulfonatos entre otros aditivos.

Según Romai² los fluidos de perforación se pueden clasificar entre dispersos y no dispersos, siendo los primeros aquellos que emplean adelgazantes en procura de potencializar las capacidades de algunos aditivos mientras los segundos no requieren agentes adelgazantes que permitan tener un mejor desempeño en la mezcla, así mismo concibe una diferenciación en que los fluidos anteriores pueden ser inhibidos o no inhibidos y cuya diferencia recae en la presencia o ausencia de iones como el calcio, el potasio o sodio en la mezcla y por tanto hacer de la misma no reactiva ante las arcillas.

Los fluidos desplegados a continuación son escogidos de acuerdo a las funciones que deban desarrollar así como condiciones de profundidad y temperatura sin dejar de lado las características de la formación a ser perforada y los diferentes planteamientos establecidos previamente.

² ROMAI, Yrán. Manual De Fluidos De Perforación. México: s.n. ,2008. p. 133.

Figura 1. Clasificación general de los fluidos de perforación



Fuente: MALDONADO BAUTISTA, Ángela María. Formulación y evaluación de fluidos de perforación de base agua de alto rendimiento aplicado al campo balcón como sustitutos de lodo base aceite. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2006. p.28-34. Modificado por los autores.

1.1.1.1 Fluidos dispersos. Son los fluidos que usan adelgazantes con el fin de mantener las arcillas de manera controlada dentro del lodo, afectando la naturaleza de las mismas e impidiendo fenómenos como la floculación y posterior decantación, en ellos se puede encontrar dos tipos como lo son.

- **No inhibidos.** Corresponde a fluidos de perforación empleados cuando las formaciones atravesadas dan un considerable aporte de sólidos indeseables. Se componen principalmente de aditivos como lo son los lignosulfonatos y los lignitos que proporcionarían un control reológico óptimo, inhibiendo los sólidos de perforación que pudieran incorporarse a la mezcla.

- **Inhibidos.** Algunos de ellos son tratados con calcio, componente empleado en procura de garantizar una estabilización de las lutitas evitando así desmoronamientos, derrumbes y eventuales daños a la formación, sin embargo debe tenerse sumo cuidado ya que su naturaleza puede dar lugar a incrustaciones o gelificación del lodo. A continuación se presentan los dos tipos de fluidos básicos con presencia de calcio, así:

- **Fluido de cal.** Fluidos empleados en formaciones lutíticas reactivas en que el hinchamiento despliega una gran desestabilización del pozo pudiendo generar desmoronamientos y cualquier otro tipo de problemas, se desarrolla a partir de un fluido levemente tratado. Se debe tener sumo cuidado en el control del pH teniendo en cuenta que la solubilidad de la cal disminuye a medida que aumenta el mismo, su control se da mediante el seguimiento a la alcalinidad del filtrado (Pf) el cual de acuerdo a Romai³ es bajo si la concentración se encuentra entre 0,8 y 2 media entre 2 y 5 y alta entre 5 y 15 centímetros cúbicos.

De igual manera el fluido presenta una limitante térmica hasta los 250°F temperatura a la cual se deshidrata y da lugar a la generación de sedimentación de sólidos afectando el control del filtrado.

- **Fluido de yeso.** Al igual que los fluidos de cal, se preparan a partir de un fluido levemente tratado, debido a su composición presentan altas pérdidas de filtrado conllevando así al uso de CMC como aditivo de control pero limitando la estabilidad térmica de la mezcla de acuerdo a las características de dicho aditivo.

³ Ibíd., p. 151.

1.1.1.2 Fluidos no dispersos. Se emplean mayormente en sistemas en los que se hace necesario mejorar la limpieza del pozo así como la tasa de penetración de la broca, permitiendo un mejor encapsulamiento de los ripios así como mejor cometido en áreas en que el sistema de lodos básico no propende por una buena limpieza.

De acuerdo al manual de perforación de la Asociación Internacional de Contratista de Perforación⁴ (IADC por sus siglas en inglés) en su composición se encuentran los poliacrilatos de sodio como elemento de control de filtrado así como de reología, debe asegurarse una concentración de calcio en menos de 100 ppm mediante el uso de soda ash y presentan una excelente estabilidad termal resistiendo hasta 400°F. A continuación se presentan convenciones generales del manual de fluidos de perforación de Romai⁵ en que se clasifican los fluidos de perforación de acuerdo a las características de su fase fluida así:

• **Inhibidos.** Los cuatro tipos de fluidos no dispersos e inhibidos generales son:

- **Agua salada.** Mezcla con fase continua rica en sales (mayor a 10000 ppm), usualmente empleada en operaciones costa afuera en donde las condiciones ofrecen agua salada más fácilmente. Da lugar a un alto filtrado el cual es contrarrestado con el uso de almidón modificado de yuca, plátano o cualquiera desarrollado para dicho objeto, dadas las condiciones se debe asegurar un ambiente básico en que el pH se encuentre entre 11 y 11,5 y resultan contraproducentes debido a la formación de espumas así como el alto índice de corrosión en las tuberías.
- **Hidróxido mixto de aluminio y magnesio (MMH) con KCl.** Mezcla de aluminio y magnesio que potencializa su capacidad inhibitoria mediante la adición de cloruro de potasio y provee estabilidad en la pared del pozo, ampliamente empleados en pozos de alta angulosidad. Aun cuando son muy efectivos en la inhibición de lutitas reactivas, requieren suma atención ante la adición de aditivos diferentes al almidón modificado en lo referido al control de filtrado ya que podría darse una interrupción en el equilibrio de la mezcla y perder sus propiedades.
- **Poliglicoles con KCl.** Debido al uso de agentes sintéticos biodegradables en una base acuosa resultan ser fluidos amigables con el medio ambiente y efectivo ante la disminución entre la interacción del agua y las formaciones reactivas.

⁴ INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DRILLING CONTRACTORS. Drilling Manual. Houston:USA:s.n. , 2000. p. O9-O10

⁵ ROMAI, Op. cit. p. 134.

- **Fluidos salinos base formiato.** Mezcla en que se emplean sales metálicas tales como el formiato de potasio, cesio y sodio, presentan grandes propiedades antioxidantes que promueven el sostén y disminución de la degradación térmica de viscosificantes y controladores de filtrado, permitiendo llevar a algunos de ellos hasta los 300°F.

Dada su composición se alcanzan altas densidades con una cantidad mínima de sólidos, así mismo es afín a las aguas de formación ricas en sulfatos y carbonatos teniendo en cuenta en que no da lugar a la precipitación de sales al entrar en contacto con los mismos.

- **No inhibidos.** Los cuatro tipos de fluidos no dispersos y no inhibidos generales son:

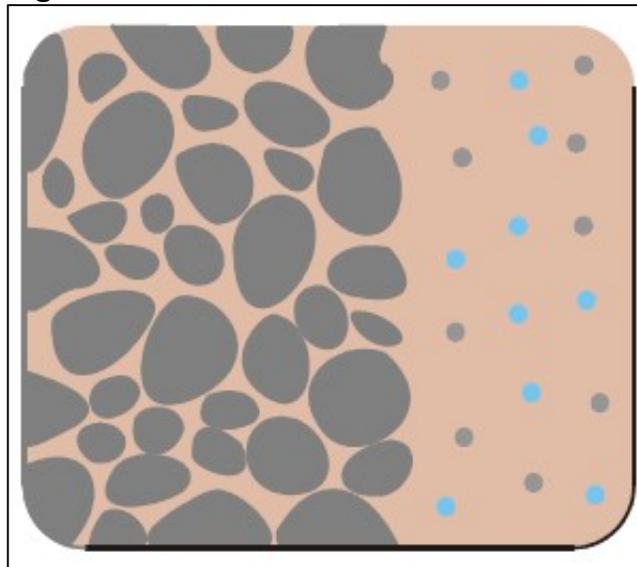
- **Fluido de inicio.** Mezcla básica de agua y bentonita empleada para las fases superficiales en las operaciones de perforación, es común encontrar variaciones de la mezcla en que se opta por el uso de cal en procura de lograr una mayor viscosidad en la mixtura y de ese modo disminuir la cantidad de bentonita a utilizar en la mezcla. Dadas las condiciones litológicas iniciales el aporte de material podría liderar al aumento en la densidad del fluido razón por la cual se aconseja que los equipos de control de sólidos se encuentren en buenas condiciones, a la vez el sistema de circulación debe garantizar altas tasas en procura de acarrear los ripios y mantener una buena limpieza del pozo.
- **Levemente tratado.** Mezcla fluida en la cual se adicionan agentes químicos que garanticen la calidad del fluido durante las diferentes circulaciones que el mismo desarrolle en la perforación, presenta como gran desventaja cedencia de sus propiedades, conllevando a contaminación con gases, sales, u otros agentes que no permitan la reutilización del mismo.
- **Bentonita/polímeros.** Mezcla con bajo contenido de sólidos normalmente empleada en formaciones de bajo aporte arcilloso. Presentan un fenómeno de reología inversa en la cual el punto cedente es mayor que la viscosidad plástica aumentando la tasa de penetración durante la perforación así como la limpieza del pozo.
- **Bentonita extendida.** Mixtura caracterizada por el uso de agentes extendedores los cuales aumentan el rendimiento del aditivo, requieren especial atención en los equipos de remoción de sólidos manteniendo control de los mismos y así evitar aumentos desmedidos de la viscosidad que pudieran liderar al empleo de adelgazantes químicos y por lo tanto mayor inversión económica durante la operación.

1.1.1.3 Fluidos poliméricos. Fluidos en base de agua dulce o salada en cuya mezcla priman los aditivos poliméricos que contribuyen en el desarrollo de funciones tales como el control de filtrado, mejor limpieza del pozo, mayor encapsulamiento de ripios e incluso mejores interfaces entre las arcillas y el agua, gran parte de los mismos se utilizan en la zona de interés teniendo en cuenta que llegan a presentar un menor daño a la formación, presentan un alto costo en su preparación razón por la cual se emplean ante específicas necesidades de la operación.

1.1.2 Fluidos base aceite. Mezcla compuesta que emplea aceite (diésel, normalmente) como fase continua y suelen presentar distintos tipos de emulsiones dependiendo de las proporciones de aceite y agua, además de las condiciones en las cuales se desarrolla el fluido como se presenta a continuación.

1.1.2.1 Emulsiones inversas. Mezcla de dos fluidos inmiscibles, en que la fase continúa y externa corresponde al aceite y la interna a agua mezclada con $CaCl_2$ (cloruro de calcio) o $NaCl$ (Cloruro de sodio), agua dulce u otra, en procura de balancear el comportamiento del lodo en referencia a las formaciones perforadas. Se establecen rangos porcentuales aceite/agua desde un 60/40 hasta 95/5. Emplean altas concentraciones de emulsificantes que procuran por la el mantenimiento de la emulsión en condiciones óptimas, y requieren aditivos controladores de filtrado que garantizan la estabilidad de la mezcla. Dicha emulsión puede ser observada en la **Figura 2**.

Figura 2. Emulsión inversa



Fuente: ROMAI, Yrán. Fluidos de Perforación. México, 2008. Modificado por los autores.

1.1.2.2 Aceite completamente. Mezcla en que la fase continua corresponde en un 100% al aceite, el cual es mezclado junto a diferentes aditivos en procura de cumplir con las funciones. Presenta como ventaja su inactividad ante formaciones reactivas, tolerancia a la contaminación por sal y altos valores de lubricidad, sin embargo su considerable impacto ambiental da lugar a un uso más restringido y específico en comparación a su contraparte, los fluidos de perforación base agua.

1.1.3 Fluidos aireados. Se consideran aquellos fluidos en los que se emplea el aire, gas natural o gas inerte capaz de proveer la mayor tasa de penetración de la broca durante la perforación en comparación de las clasificaciones mencionadas previamente. Debido a la falta de una fase continua capaz de dar sostén continuado a los ripios acarreados se recomienda evitar su uso en formaciones que den lugar a grandes proporciones de material de aporte.

De igual manera la presencia de agua disminuye el desempeño del fluido, razón por la cual se da lugar a la adición de agentes espumantes capaces de alterar la razón de la tensión interfacial de las fases y dando lugar a una disposición del agua encontrada durante las operaciones, estos fluidos también son conocidos como fluidos en base de niebla.

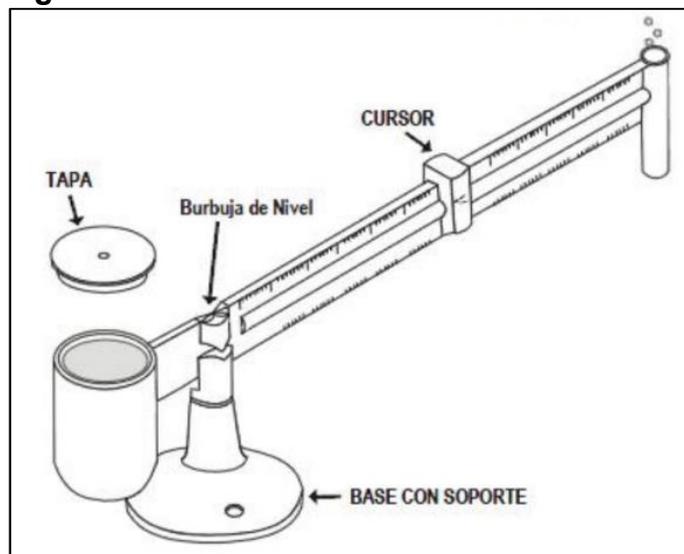
1.2 PRUEBAS FISICOQUÍMICAS DESARROLLADAS A LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Con el fin de establecer si son correctas las propiedades del fluido de perforación, durante el proceso de preparación perforación se llevan a cabo mediciones de diferentes propiedades las cuales tendrán por objeto mostrar el comportamiento de la mezcla a determinadas condiciones. En busca de tener parámetros de cotejo se emplea como guía experimental el conjunto de prácticas que aparecen en la norma del *"American Petroleum Institute - Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids"* en sus apartados API RP 13B-1 para fluidos base agua y API RP 13B-2⁶. A continuación se presentan algunas de las prácticas más comunes.

⁶ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5 ed. Washington, USA:s.n. ,2013. p.10.

1.2.1 Densidad. También conocida como densidad del fluido, pone en evidencia la relación entre la masa y una unidad de volumen establecida, tiene por función conservar los fluidos de la formación sin ingresar al pozo mediante el establecimiento de una presión superior a la de la formación logrando mantener una presión hidrostática. Su valor se determina mediante el equipo conocido como balanza de lodos, la cual corresponde a un copa con tapa unido en uno de los extremos de un brazo graduado, sobre el cual se busca establecer la medida adecuada hasta que el nivel encontrado en el equipo se estabilice, mediante el desplazamiento de un cursor en el brazo, además de contar con un nivel que para indicar el equilibrio en el equipo. A continuación se muestra lo mencionado en la **Figura 3.**

Figura 3. Balanza de lodos



Fuente: YRÁN. Romai. Manual de Fluidos de Perforación. 2008: Mexico. p. 17. Modificado por los autores.

El equipo debe ser calibrado con agua dulce con frecuencia arrojando un valor de 8,345 lb/gal a 70 °F, en caso de no reportar este valor se debe ajustar con el tornillo de balanceo o balines de plomo en la esquina contraria de la copa, a fin de obtener lo indicado. Las unidades de medida brindadas son libras por galón (lb/gal) otra medida usaba con frecuencia es dicha densidad como un gradiente de presión en unidades de libra por pulgada cuadrada por cada 100 pies (lpc/1000 ft), lo anterior con el fin de hacer más cómodo los cálculos de presiones hidrostáticas, obteniendo así presiones en las mismas unidades que las utilizadas en el yacimiento, las bombas y en general el instrumental del pozo. El procedimiento usado para medir esta propiedad de acuerdo a la norma API RP 13B-2⁷ es:

⁷ Ibíd., p. 10.

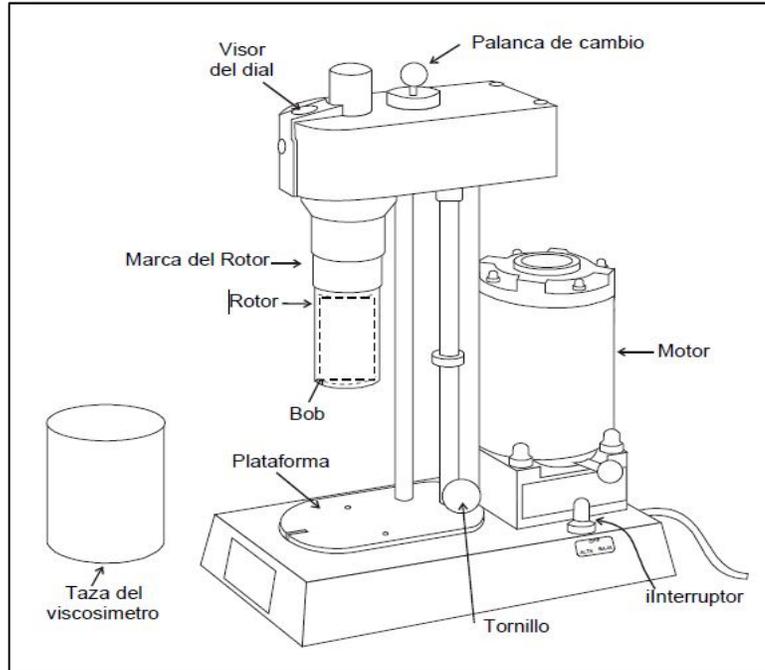
- Fijar en una superficie plana y estable la balanza.
- Medir la temperatura a la cual se encuentra el fluido
- Llenar la copa limpia y seca con lodo, posteriormente asegurar la tapa de tal manera que por el orificio que posee esta salga un poco de fluido, con el fin de asegurar no quede aire atrapado en la copa.
- Sujetar firmemente la copa tapada con el agujero cubierto por un dedo, lavando y limpiando el exterior de la copa, de tal manera que esta quede seca al terminar.
- Colocar en el soporte y ajustar el peso de manera que la burbuja se encuentre en medio en el nivel
- Leer de la escala necesitada el valor de la densidad del fluido.

Para la calibración mencionada se procede bajo el mismo procedimiento cambiando el fluido de perforación por agua dulce, como se mencionó anteriormente. Tanto para fluidos cuya fase continua es aceite o agua el procedimiento que se aplica es el mismo, con la salvedad que en lodos base aceite se debe prestar mayor atención a la limpieza de la copa durante todo el procedimiento.

1.2.2 Reología. La reología un área de la física en que se estudian los principios que regulan el movimiento de los fluidos, es decir, la relación que hay entre los esfuerzos y la deformación de un elemento, se recurre a un viscosímetro de indicación directa conocido en el campo como viscosímetro de Fann, mediante el cual se permiten establecer parámetros tales como el punto cedente, la viscosidad plástica y la resistencia al gel sometiendo al fluido de muestra a una rotación continua y a diferentes velocidades en un periodo de tiempo determinado que brinda así una muestra de los parámetros previamente enunciados.

El equipo con el cual se realizan las mediciones consta de dos cilindros (rotor y taza) concéntricos los cuales simulan el anular de un pozo, que al girar crean el torque necesario para simular la fricción que se da durante las operaciones de perforación, el giro es provocado por un motor eléctrico ubicado en la parte anterior del equipo, el cual mediante el uso de una caja de velocidades que actúa con un sistema de engranajes permite las diferentes velocidades del rotor, el arrastre generado es proporcionado por una balanza de torsión. Un esquema básico de su diseño se presenta en la **Figura 4** y la **Imagen 1** pone en evidencia el equipo utilizado en el laboratorio.

Figura 4. Viscosímetro de lectura directa.



Fuente: YRÁN. Romai. Manual de Fluidos de Perforación. 2008: Mexico. p. 19. Modificado por los autores.

Imagen 1. Viscosímetro de lectura directa



El procedimiento utilizado para las mediciones de acuerdo a la norma API RP 13B-2⁸ es:

- Llenar el recipiente con lodo de tal manera que quede un espacio suficiente para ser desplazado al sumergir el rotor centrar hasta la marca que este posee.
- Situar la velocidad del equipo en 600 rpm esperando que el dial se estabilice y una vez esto tomar la medida.
- Disminuir la velocidad del rotor a 300 rpm y una vez estabilizado proceder a la toma de la medida.
- Agitar a 600 rpm durante 10 segundos y luego detener el equipo.
- Esperar 10 segundos y proceder a realizar la medición a 3 rpm, el máximo valor registrado es la medida a tomar
- Dejar en reposo 10 min y volver a tomar la medida a 3 rpm.

El anterior procedimiento es igual para fluidos base agua y base aceite, teniendo como única diferencia que en fluidos base aceite el fluido debe encontrarse a 120 °F al iniciar el procedimiento, en este caso se tiene como máximo una temperatura de 190°F debido a que en temperaturas superiores se puede generar vapor, causando con ello burbujas y por lo tanto generando riesgo de explosión.

1.2.2.1 Viscosidad Plástica. Hace referencia a la resistencia al flujo generada por fricción, entre las partículas suspendidas y la viscosidad de la fase continua, es decir depende directamente de la concentración de sólidos presentes así mismo como su tamaño y forma, su valor se obtiene por la resta entre la medida a 600 rpm y la medida a 300 rpm y su unidad de medida son los centipoise (cP); Su determinación está dada por la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Viscosidad Plástica

$$\eta_{VP} = R_{600} - R_{300}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p. 17.

Donde:

η_{VP} : Viscosidad Plástica

R_{600} : Lectura a 600 RPM

R_{300} : Lectura a 300 RPM

⁸ Ibíd., p. 16.

1.2.2.2 Punto cedente. Representa una medida de la capacidad de limpieza del lodo en el pozo, se evidencia en las fuerzas de atracción tenidas por las partículas de arcilla cuando el fluido de perforación se encuentra en movimiento, es resultado de la carga eléctrica positiva o negativa que se en la superficie de cada partícula. Su valor es obtenido de restar a la medida a trescientos (300) rpm el valor de la viscosidad plástica y su unidad de medida es libra por cada cien pies cuadrados ($\text{lb}/100\text{ft}^2$). Para tal fin se procede según conforme a la **Ecuación 2**.

Ecuación 2. Punto Cedente

$$YP = R_{300} - \eta_{VP}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p. 17.

Donde:

YP: Punto cedente

η_{VP} : Viscosidad Plastica

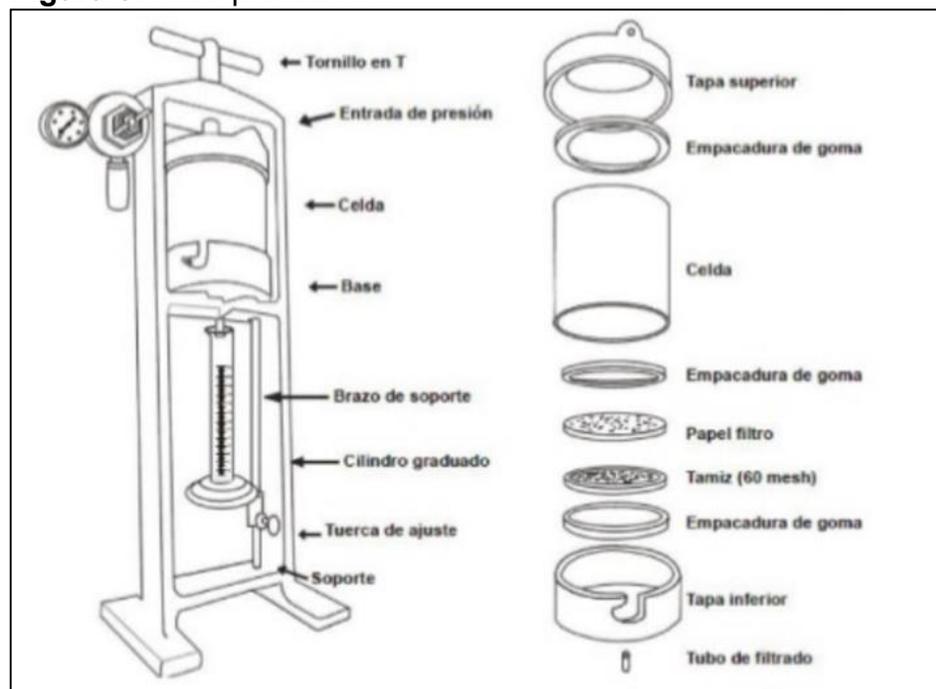
R_{300} : Lectura a 300 RPM

Esta propiedad se ve afectada por la presencia de solidos reactivos de la formación, carbonatos y calcio, mostrandose con un elevado valor en lodos floculados; un punto cedente alto unido a una viscosidad plastica baja permite una evacuación de solidos eficiente del pozo mateniendo una tasa de penetración alta durante la perforación.

1.2.2.3 Resistencia al gel. Es una medida de las fuerzas de atracción entre las partículas suspendidas en un fluido, el cual se encuentra en condiciones estáticas, y está relacionado con la capacidad del fluido de suspender sólidos, siendo indispensable cuando el fluido llega a los tanques en superficie pues permite la decantación en la trampa de arena y la separación del gas que pueda tener el fluido, una vez este llega a los desgasificadores; en el pozo reduce el efecto de succión cuando se procede a sacar la tubería del pozo. Su unidad de medida corresponde a ($\text{lb}/100\text{ft}^2$), su valor corresponde a la medida registrada a 3 rpm y se miden en dos momentos obteniéndose lecturas de gel inicial y gel final.

1.2.3 Filtrado estático (Filtrado API). Representa la medida relativa de fluido que atraviesa una formación porosa y permeable así como el revoque que se forma en la pared de la misma. Para su medición respectiva se utiliza el filtro prensa API, equipo que trabaja a condiciones de temperatura ambiente y presión de cien (100) lpc generalmente, y sobre el cual se miden los centímetros cúbicos de fluidos atravesados en 30 min, tiene por unidad de medida (cm³/30 min), como aspecto adicional se presenta el espesor de la torta (remanente en el medio poroso) en treinta y dozavos de pulgada. El equipo (**Figura 5**) consta de una celda con una tapa inferior con un agujero para que salga el filtrado y una tapa superior donde es ajustada por un tornillo y es suministrada la presión, en la zona inferior se cuenta con una malla, dos empaques plásticos y para cada medición se debe utilizar un papel filtro diferente, a forma de observar el equipo utilizado en el laboratorio se presenta la **Imagen 2**.

Figura 5. Filtro prensa API



Fuente: YRÁN. Romai. Manual de Fluidos de Perforación. 2008: Mexico. p. 21.
Modificado por los autores

Imagen 2. Filtro Prensa API



El procedimiento que se realiza para fluidos base aceite difiere a la temperatura a la cual se debe encontrar, con un valor de 120 °F, de resto sigue los mismos pasos de acuerdo a la norma API RP 13B⁹ :

- Acoplar la celda con la base de modo que quede en la siguiente secuencia: tapa base, empaque de caucho, malla (60 mesh), papel filtro, empaque de caucho y celda.
- Llenar la celda hasta una (1) pulgada del tope de la misma con el fin de brindar espacio para alguna expansión del fluido.
- Asegurar la tapa superior con el tornillo y asegurar de que el sistema sea hermético.
- Colocar la celda de gas (preferiblemente nitrógeno o CO₂), llevando el sistema a una presión de 100 lpc.
- Filtrar por 30 min y recoger el volumen filtrado en una probeta graduada.(Dicho volumen es reportado como filtrado API (cm³))
- Aliviar la presión de la celda y vaciar con cuidado el lodo restante.
- Medir el grosor del revoque formado en el papel filtro (1/32 “)

⁹ Ibíd., p. 20.

En el caso citado del fluido base aceite donde se requiere temperatura el equipo varia y la medición se conoce como Filtrado HP-HT (*High Pressure – High Temperature*).

1.2.4 Alcalinidad. Análisis químico desarrollado al lodo y al filtrado del mismo en el cual se desarrollan mediante titulación , usando agentes indicadores como la fenolftaleína y el naranja de metilo, así como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,02 N como titulador. Para este procedimiento se utilizan dos fases en la primera se tiene el siguiente procedimiento de acuerdo a la norma API RP 13B¹⁰ :

- Tomar una alícuota del filtrado API y transferir cuantitativamente a un recipiente para realizar la titulación (Erlenmeyer) , diluir con agua destilada para cuando se realice el procedimiento para el filtrado, y el caso de lodo base agua, para lodo base aceite diluir con un diluyente a fin con la base.
- Agregar 2 o 3 gotas de fenolftaleína.
- Agregar H_2SO_4 previamente llevado a volumen en una bureta, gota a gota manteniendo una agitación constante en la solución.
- Detener la titulación una vez la solución recupere el color original (viraje de rosa a color original)
- Anotar dicho valor como $V_{H_2SO_4}$ en caso de no darse el viraje inicial a rosa, proceder a realizar la misma titulación usando como titulador NaOH 0,01M anotar dicho valor como V_{NaOH} .

En este caso se procede a identificar el caso en el cual se encuentra la solución, si fue necesario usar H_2SO_4 indicara la alcalinidad del lodo, en caso contrario la acidez del mismo.

1.2.5 Cloruros. Se refiere a la cantidad de iones de cloro presentes en el filtrado del lodo, su concentración es vital debido a que las propiedades de las arcillas presentes en el fluido varían originando problemas de floculación, al igual que la solubilidad de aditivos como lubricantes, polímeros, etc. Su determinación se realiza utilizando como indicador cromato de potasio (K_2CrO_4) y como titulador nitrato de plata ($AgNO_3$) 0,0282 N de acuerdo a la norma API RP 13B¹¹ de la siguiente manera:

- Tomar una alícuota del filtrado API en un recipiente.
- Diluir la alícuota con agua destilada, hasta obtener un volumen donde sean observables los virajes de los indicadores.
- Repetir el procedimiento especificado para determinación de alcalinidad.

¹⁰ Ibid., p. 36.

¹¹ Ibid., p. 37-38.

- Agregar 5 gotas de K_2CrO_4
- Titular con $AgNO_3$ en una bureta previamente aforada, gota a gota y manteniendo continua agitación en la solución, hasta que el color amarillo vire a rojo ladrillo y permanezca.
- Registrar la cantidad de $AgNO_3$ gastado para el viraje.

Una vez evaluado esto se procede a calcular la cantidad de cloruros presentes en el filtrado, mediante la **Ecuación 3**.

Ecuación 3. Concentración de Cloruros

$$Cl^{-}(ppm) = \frac{(cm^3 AgN_3 \text{ gastados} * 1000)}{Volumen \text{ Alicuota}(mL)}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p. 38.

Para expresar la cantidad de Cl^{-} en $NaCl$ se multiplica por 1,65 dando con ellos ppm de $NaCl$

1.2.6 Dureza. Es causado por la cantidad de sales de magnesio y calcio que se encuentran disueltas en el filtrado o en el agua con que este fue elaborado. Su determinación se realiza utilizando una buffer amoniacal ($NH_3 - NH_4^+$), como indicador se usa negro de eriocromo y ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) 400 ppm como titulador. El procedimiento de acuerdo a la norma API RP 13B¹² es:

- Tomar una alícuota del filtrado API, y diluir en un recipiente hasta obtener un volumen donde sea observable el viraje.
- Agregar 1 cm^3 de solución estabilizadora.
- Agregar 1 g de indicador de calcio.
- Titular con EDTA en una bureta previamente aforada, gota a gota hasta que se dé el viraje de color vino a color azul, es necesario mantener una agitación constante.
- Registrar el volumen de EDTA gastado.

Una vez obtenido dicho volumen se procede a calcular la concentración de calcio en el filtrado mediante la **Ecuación 4**.

¹² Ibid., p. 38.39.

Ecuación 4. Concentración de Calcio

$$Ca^{+2} (ppm) = \frac{Volum \text{ EDTA gastado} * 400}{Volumen \text{ alicuota}(mL)}$$

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p. 38.

1.2.7 pH. El pH es una manera de estimar la acidez o basicidad del fluido de perforación, sobre el cual se desarrollan dos prácticas, la primera de ellas conocida como método colorimétrico consiste en una cinta que cambia de color al entrar en contacto con el fluido, este es posteriormente cotejado con los patrones para así establecer el rango en que se encuentra.

Como medida alterna y de mayor precisión se encuentra el método que usa un potenciómetro, el cual consta de un equipo electrónico con un electrodo el cual evalúa el potencial eléctrico, al ser sumergido en la muestra da como resultado un número correspondiente al pH de la solución, debe tenerse en cuenta su calibración y limpieza para garantizar el óptimo funcionamiento de la herramienta.

Debe ser previamente calibrado con soluciones buffer de pH conocido (4, 7, 10) y mantener el electrodo en una solución estabilizadora cuando no se encuentre en uso, ser lavado con agua destilada antes y después de cada medición para evitar contaminación cruzada de la muestra o la solución buffer y por lo tanto alteraciones en la medición.

1.2.8 Lubricidad. La lubricidad es el conjunto de pruebas desarrolladas a los fluidos de perforación en que se simulan las condiciones de torque y arrastre generadas en un pozo, tiene como referente el coeficiente de fricción del agua a partir del cual se determina la calibración del equipo y se debe realizar de manera frecuente a fin de obtener mediciones exactas.

Consta de un análisis físico desarrollado a una muestra de fluido para el cual se usa un instrumento denominado lubricímetro, el cual brinda una medida del torque que sufre un bloque al entrar en contacto con un anillo. El lubricímetro es mostrado a continuación en la **Imagen 3**.

Imagen 3. Lubricímetro



El procedimiento para la determinación del coeficiente de fricción con base en el torque registrado está dado por:

- Armar el lubricímetro y proceder a su encendido durante 15 min sin aplicar torque anillo.
- Contando con todas las partes del equipo limpias previamente con algún solvente, proceder a tener de 260 a 280 mL del fluido de prueba en el recipiente metálico.
- Aplicar 150 lpc de torque al anillo, teniendo en posición el bloque de prueba, con la precaución de nunca aplicar torque si no se encuentra el conjunto sumergido en fluido.
- Llevar el equipo hasta 60 rpm y a los cinco (5) minutos registrar el torque medido.

Este procedimiento se debe aplicar tanto para los fluidos de perforación a evaluar como para agua destilada, lo anterior con el fin de evaluar el factor de corrección del coeficiente de fricción (μ), mediante la **Ecuación 5**.

Ecuación 5. Coeficiente de Fricción

$$\mu = \frac{\text{Lectura con fluido a probar} * \text{factor de corrección}}{100}$$
$$\text{factor de corrección} = \frac{34}{\text{Lectura con agua destilada}}$$

Fuente: OFITE. EP (Extreme Pressure) and Lubricity Tester Instruction Manual. Ver 3. Houston, USA: 2016. p.11-14.

La lectura realizada a 60 rpm con agua destilada debe mantenerse entre 32 y 36, de lo contrario es necesario desmontar el equipo y proceder a hacer una limpieza más minuciosa del mismo.

1.3 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación representan un aspecto esencial en las operaciones de perforación, aun cuando los mismos son diseñados de acuerdo a requerimientos específicos de la formación de interés, en procura de mitigar alguna problemática presentada durante la operación o simplemente dadas las condiciones del pozo en cuestión se da lugar a un bosquejo generalizado de las tareas que los fluidos de perforación han de desempeñar a la hora de llevar a cabo una perforación con los mismos, así:

- **Transmisión de potencia hidráulica a la broca:** El fluido de perforación bombeado desde la superficie conlleva energía la cual tendrá por objeto alimentar los motores de fondo que no solo transmiten energía a la broca sino también al conjunto de herramientas de medición y evaluación presentes durante la perforación (MWD y LWD), garantizando la mayor presión del fluido al salir a través de las boquillas broca.
- **Enfriamiento y lubricación de la sarta de perforación y la broca durante la circulación en el arreglo:** La sarta de perforación y la broca son sometidas a un conjunto de esfuerzos de torsión y arrastre durante las operaciones de perforación, esto implica que el rozamiento que se encuentra entre estos elementos y las formaciones dan lugar a la generación de calor, el cual sumado a aquel generado por los motores de fondo puede dar lugar a daños de los arreglos de tubería en fondo así como herramientas asociadas a los mismos, para ello la circulación de fluido de perforación da lugar a la disipación de energía calórica a través del pozo, ejerciendo su función esencial como agente refrigerante así como algunas secundarias relacionadas con la extensión de la vida útil de la sarta y todo el conjunto de componentes asociados a la misma.

- **Remoción y acarreamiento de los ripios del fondo del pozo hasta la superficie evitando problemas operacionales:** La perforación de una formación trae consigo la presencia de ripios o cortes es decir cuerpos rocosos triturados y asentados en la parte baja cercana a la broca, su acumulación conlleva a problemas operacionales tales como las pegas, es decir atascamientos por aglomeración, disminución de la tasa de penetración de la broca e incluso detenimiento de la misma, por ello se procede al continuo flujo de los fluidos de perforación de manera que se garantice una remoción periódica que mitigue dicha problemática.

Dado el diseño del fluido, presenta propiedades físico-químicas capaces de acarrear los ripios a través del espacio anular, llevándolos hasta la superficie y asegurando una función de limpieza óptima del pozo durante las operaciones desarrolladas en el mismo.

- **Proveen una columna hidrostática capaz de controlar los fluidos que se encuentran en la formación durante la perforación:** Siendo esta una función básica, el fluido de perforación asegura el control de presiones en el fondo del pozo, se encuentra una relación directa entre la densidad del lodo y la presión generada por el mismo. Normalmente ello se logra con el uso de barita o carbonato de calcio siendo estos aditivos densificantes empleados en los fluidos de perforación, proporcionando así un medio de control para los fluidos encontrados en las formaciones disminuyendo de sobremanera las posibilidades de un reventón en el pozo.
- **Brindan soporte a las paredes del pozo:** Durante la perforación, la broca y el arreglo de tubería se encarga de dar la densidad y rotación necesaria para abrir paso a través de las formaciones y encaminar así el desarrollo del pozo, debido que un área queda desnuda se requiere un fluido con las características físico-químicas necesarias para evitar reacciones y así dar sostén a las paredes hasta que las mismas sean cementadas y revestidas en procesos posteriores, es así como el lodo actúa como agente de control mecánico usando la presión que ejerce como mitigante de los esfuerzos encontrados en las paredes del pozo.
- **Control de corrosión:** Siendo el fluido de perforación el medio fluido que interactúa de forma continua con las paredes metálicas de las tuberías este debe garantizar las condiciones adecuadas en referencia a la presencia de gases corrosivos tales como el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrogeno y el oxígeno mismo, para de ese modo evitar daños y eventuales cambios de tubería que solo aumentarían los tiempos no operacionales y por tanto los costos de la operación.

Asegurando un pH idóneo para las superficies metálicas así como un continuo tratamiento en contra de los contaminantes que pudieran disolverse en el fluido, se asegura el desarrollo de la vida útil de la sarta (**Ver Imagen 4**) y por tanto llevar a cabo las operaciones en condiciones más seguras y efectivas.

Imagen 4. Corrosión de tubería



Fuente: PerfoBlogger. Lavado de la tubería y/o hoyo (Wash out). 2015. [en línea]. Disponible en: <<http://goo.gl/T50MMj>> [consultado el 27.01.2016]

- **Cierre de formaciones permeables.** Siendo la permeabilidad una propiedad innata de los cuerpos rocosos, la cual hace referencia a la capacidad de los fluidos de moverse en el medio poroso dado un determinado diferencial de presión, se tiene el fluido de perforación y su capacidad de generar revoque en las paredes del pozo, siendo este una porción de lodo que se filtra y genera una capa delgada de menor permeabilidad capaz de reducir el filtrado de lodo en la formación así como de darle mayor estabilidad al pozo durante la perforación.

Debe tenerse en cuenta que las funciones previamente mencionadas tendrán como factores críticos el desempeño de los equipos utilizados, la calidad de los productos empleados así como el ingenio y experiencia del personal en procura de ajustar las propiedades de la mezcla a las necesidades y/o eventualidades presentes durante las operaciones.

1.4 ADITIVOS

Los aditivos son sustancias que se agregan al fluido de perforación con el fin de modificar las propiedades físico-químicas del mismo de acuerdo a lo deseado, de acuerdo a la función que cumplen tienen una clasificación, un costo, y deben ser tenidos en cuenta a la hora de las mediciones, pues algunos presentan características distintas dependiendo del medio en el cual se encuentran, la temperatura y su interacción con otros aditivos. A continuación se presentan de acuerdo a su función las propiedades y singularidades de ellos.

1.4.1 Densificantes. Son materiales inertes no tóxicos ni peligrosos de manejar, que se utilizan para aumentar la densidad del fluido y por lo tanto, controlar la presión que presente la formación y los derrumbes que ocurren en aquellas áreas no consolidadas o en las cuales la perforación dio condiciones para este fenómeno, se debe tener especial cuidado con no sobrepasar la densidad requerida o se podría incurrir en problemas de pega, invasión del lodo a la formación y daños en las bombas de superficie.

Cuando se va a utilizar este tipo de aditivos existen varios escenarios en los cuales, se da la densificación y de acuerdo a las variables que se desean controlar se pueden aplicar diferentes cálculos tanto para el aumento de la densidad como la disminución; en el caso en cual una variación (aumento) de los volúmenes de fluido no son un aspecto crítico los cálculos correspondientes para el aumento de la densidad están dados por la **Ecuación 6**.

Ecuación 6. Aumento de densidad con volumen libre

$$m = \frac{(350,5)(\gamma_m)(\rho - \rho_i)}{((8,345)(\gamma_m)) - \rho} * V_i$$

Fuente: BAROID. Manual de Fluidos. Houston, USA: 2000. p. 417.

m: Masa del densificante en lb

γ_m : Gravedad específica del densificante

ρ : Densidad deseada en lb/gal

ρ_i : Densidad inicial en lb/gal

V_i : Volumen inicial de lodo en bls

En el momento que se desea lograr una reducción en el valor de la densidad, sin tener en cuenta el volumen final de fluido obtenido se utiliza la dilución como método y está regido por la **Ecuación 7**, la cual se presenta a continuación.

Ecuación 7. Reducción de densidad con volumen libre

$$V_r = V_i \left(\frac{\rho_i - \rho}{\rho - (8,345)\gamma_d} \right)$$

Fuente: BAROID. Manual de Fluidos. Houston, USA: 2000. p. 417.

γ_d : Gravedad especifica del diluyente

ρ : Densidad deseada en lb/gal

ρ_i : Densidad inicial en lb/gal

V_i : Volumen inicial de lodo en bls

V_r : Volumen de diluyente requerido en bls

En caso contrario donde no se cuenta con espacio disponible para almacenar fluido, o de maneja adjunta al cambio de densidad se necesita alcanzar un volumen especifico de lodo se dan los mismos dos escenarios, de reducción y aumento de densidad para el primer caso el cálculo necesario es regido por la **Ecuación 8.**

Ecuación 8. Reducción de densidad a volumen especifico

$$V_i = \left(\frac{(8,345)\gamma_d - \rho}{(8,345)\gamma_d - \rho_i} \right) * V_f$$

Fuente: BAROID. Manual de Fluidos. Houston, USA: 2000. p. 418.

γ_d : Gravedad especifica del diluyente

ρ : Densidad deseada en lb/gal

ρ_i : Densidad inicial en lb/gal

V_i : Volumen inicial de lodo en bls

V_f : Volumen final deseado en bls

La diferencia entre el volumen inicial y el volumen final constituye el volumen que se debe agregar para la reducción en la densidad. De manera paralela cuando el objetivo es el aumento de la densidad teniendo como parámetro un volumen

especifico, la cantidad de aditivo densificante necesario es dada por la **Ecuación 9**, que se presenta a continuación.

Ecuación 9. Aumento de la densidad con volumen específico.

$$V_i = \left(\frac{(8,345)\gamma_m - \rho}{(8,345)\gamma_m - \rho_i} \right) * V_f$$
$$m = (V_f - V_i)\gamma_m(350,5)$$

Fuente: BAROID. Manual de Fluidos. Houston, USA: 2000. p. 417.

m: Masa del densificante en lb

γ_m : Gravedad específica del densificante

ρ : Densidad deseada en lb/gal

ρ_i : Densidad inicial en lb/gal

V_i : Volumen inicial de lodo en bls

V_f : Volumen final deseado en bls

1.4.1.1 Barita. Es el densificante más conocido, tiene por fórmula química $BaSO_4$, es considerado un sedimento y según Romai ¹³ tiene un tamaño de partícula de 44 μm , es producto de la molienda de diferentes fuentes de barita y presenta un color gris tenue a café, con este aditivo es posible alcanzar densidades de 20 lb/gal más sin embargo posee un carácter costoso por lo tanto para altas densidades se suele usar, densificantes de mayor gravedad específica.

Su uso se da en formaciones en las cuales se requiere una de densidad superior a 12 lb/gal, para valores menores a este se utiliza Carbonato de Calcio ($CaCO_3$). De acuerdo a la norma API debe tener una gravedad específica de al menos 4,2 y poseer una cantidad menor a 250 ppm de calcio¹⁴, tiene una solubilidad muy baja en agua (4×10^{-5} lb/gal).

¹³ ROMAI. Op. cit. p. 100.

¹⁴ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13A. 5 ed. Washington, USA: 2013.

1.4.1.2 Carbonato de Calcio. Es un material inerte de baja gravedad específica (2,7) y es usado como aditivo densificante, llevando el fluido a densidades de máximo 14 lb/gal, su solubilidad es alta en ambientes ácidos, siendo totalmente soluble en HCl al 15% y presenta una mejor dispersión que la barita en lodos base aceite.

1.4.2 Viscosificantes. Son aquellos aditivos que brindan le permiten al fluido mejorar su capacidad de remover los ripios, suspender los sólidos inertes a lo largo de la operación de perforación, suelen tener una susceptibilidad a factores de temperatura y química adyacente, están divididos en dos tipos de acuerdo a su naturaleza:

1.4.2.1 Arcillas. Son un material plástico que aportar viscosidad al fluido de perforación, están compuestos por silicatos hidratados de metales, existen dos que son principalmente usados en la elaboración de lodos de perforación.

- **Bentonita:** Es un arcilla compuesta, principalmente por montmorillonita con cantidades bajas de otros minerales del grupo de las esmectitas, esta se dilata si se expone al agua, lo cual le brinda la propiedad de proteger la formación de la invasión de los fluidos de perforación, creando daño en el pozo, perdidas de presión durante la perforación, etc.¹⁵
- **Atapulgita:** Es un mineral compuesto por silicato de magnesio y aluminio, se puede utilizar en fluidos cuya base es agua salada obteniendo con ello una viscosidad suficiente para que a bajas ROP se dé el arrastre necesario para llevar los ripios a superficie y suspender los agentes densificantes; a diferencia de la bentonita no proporciona capacidad de controlar el filtrado de lodo hacia la formación, en fluidos base aceite es necesario proporcionar una amina cuaternaria con recubrimiento de tal manera que pueda dispersarse y comportarse como un gel.¹⁶

¹⁵ SCHLUMBERGER LIMITED. Oilfield Glossary. [en línea]. [Consultado el 01/27/2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/WFyHT3>>.

¹⁶ SCHLUMBERGER LIMITED. Oilfield Glossary. [en línea]. [Consultado el 01/27/2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/69xZBm>>.

1.4.2.2 Polímeros. Son moléculas extensas compuestas por unidades que se repiten, algunos son de origen natural (goma xantano, almidón) y otro de origen sintético (poliacrilamida), tienen diferentes estructuras y los monómeros que los componen pueden ser de más de un mismo tipo en el caso de los copolímeros, aquellos que se ionizan son llamados polielectrolitos¹⁷; dependiendo de su longitud y por lo tanto su peso molecular pueden variar en sus propiedades, algunos de los más usados son:

- **Carboximetilcelulosa (CMC).** Es un polímero modificado el cual en pH bajos aumenta la flexibilidad y por lo tanto disminuye la viscosidad que aporta al fluido, se disuelve fácilmente en agua y dado que permite un control de la viscosidad también tiene propiedades como agente de suspensión para los sólidos inertes del lodo, además de tener la característica de retener agua, dando lugar al control de las propiedades del fluido en caso de influjos y usarse como controlador de filtrado, se suele utilizar en concentraciones 1 a 1,5 lb/gal.
- **Goma xantica.** Es un polímero de origen natural el cual es susceptible de verse afectado por el pH y la dureza del ambiente en cual se encuentra, requiriéndose de un bactericida para evitar la descomposición de la misma, otra característica que causa degradación de este es la temperatura (200 a 250 °F).¹⁸

1.4.3 Controladores de filtrado. El filtrado consta de la fase acuosa que pasa a la formación a causa de la diferencia de presión entre el pozo y la misma, lo cual causa un daño y perjudica la permeabilidad, por tal razón es de vital importancia medirla...**Ver 1.2.3**...y controlarla mediante aditivos que eviten se dé, según Romai a través de tres mecanismos, disminuyendo la permeabilidad en la pared del pozo mediante una acción de puenteo, el incremento de la viscosidad de la fase líquida y el desarrollo de un revoque impermeable y compresible¹⁹; este último debe tener una calidad dada por el tamaño de partícula, puesto que es formado por los sólidos arcillosos presentes en el fluido. Tanto la goma xantica como el carbonato de calcio ayudan a los mecanismos descritos, la goma brindando viscosidad y el carbonato como agente puenteante.

De manera alterna los lignitos forman un coloide que taponan y evita la pérdida de fluido, alternando características de solubilidad su parte insoluble otorga lo mencionado y su parte soluble ayuda con la defloculación de arcillas que podrían aumentar la viscosidad del lodo, poseen una solubilidad sensible al pH, por lo tanto son usados en lodos con un valores de entre 8 y 9,5 de acuerdo con la

¹⁷ SCHLUMBERGER LIMITED. Oilfield Glossary. [en línea]. [Consultado el 01/27/2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/K96X5m>>.

¹⁸ SCHLUMBERGER LIMITED. Oilfield Glossary. [en línea]. [Consultado el 01/27/2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/LqRfbO>>.

¹⁹ ROMAI. Op. cit. p. 105.

norma API²⁰, en altas temperaturas controlan mejor el filtrado que los lignosulfonatos, estos últimos al tener el grupo sulfonato tienen mayor solubilidad.

1.4.4 Controladores de reología. Tienen por función aumentar o reducir la viscosidad del fluido, en el primer caso son agentes viscosificantes...**Ver 1.4.2**...en el segundo caso son conocidos como agentes adelgazantes y funcionan mediante defloculación, es decir neutralizando la carga eléctrica de las arcillas cambiando la carga superficial de las partículas y haciendo que con ello se repelan evitando la formación de sólidos de mayor tamaño.

Si bien existen adelgazantes de carácter polimérico, el de mayor uso son los lignosulfonatos, en los cuales su propiedad adelgazante se ve relacionada inversamente con su peso molecular de manera que entre más bajo es mayor efecto tienen, pero pierde efecto como controlador de filtrado; Conforme lo expresado por Romai, a temperaturas superiores a los 300 °F se degradan el CO₂ y H₂S dando lugar a un escenario en el cual al reaccionar con iones hidroxilo se forman carbonatos alterando la dureza del fluido y su pH.²¹

1.4.5 Controladores de pH. Son aditivos encargados de aportar los iones hidroxilo necesarios para que el fluido alcance el pH deseado, normalmente son usados hidróxidos de sodio, calcio y potasio; dependiendo de las necesidades del fluido se encuentran lodos de bajo pH (7,5 – 9,5) y de alto pH (9,5 - 11,5). Es de vital importancia controlar este factor pues como se ha mencionado de esto depende la solubilidad de aditivos como polímeros, lignosulfonatos e iones libres, un ejemplo de este último caso son los iones de calcio (Ca⁺²) los cuales en ambientes altamente alcalinos pierden solubilidad y por lo tanto capacidad de generar daño al fluido, por otro lado un pH de valores diferentes a los deseados pueden indicar la presencia de contaminantes como cemento.

1.4.6 Controladores para pérdida de circulación. Son materiales de distintos tipos y procedencias los cuales ayudan a controlar en diferentes grados las pérdidas de fluido que se pueden dar durante la perforación del pozo. Algunos de los más relevantes organizados de acuerdo a su forma se muestran en el **Cuadro 1**, presentado a continuación

²⁰ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Op.cit.

²¹ ROMAI. Op. cit. p. 108-109.

Cuadro 1. Clasificación de controladores de pérdida de circulación

Escamosos	Celofán
	Cascaras de semillas
	Mica
Granulares	Carbón
	Cascara de frutos secos
	Carbonato de calcio
Fibrosos	Asbesto
	Madera
	Llantas de goma y caucho

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS LUBRICANTES

Como parte de los aditivos de los fluidos de perforación se tienen diferentes sustancias las cuales son identificadas y seleccionadas debido a la función que desempeñan, como se mencionó en el apartado de aditivos...**Ver 1.4...**, uno de los tipos de aditivos en los cuales se profundiza menos son en los lubricantes, puesto que al tener un costo elevado y ser usados de manera sumamente específica son un área de baja exploración en la investigación al ser comparados con ejemplos como inhibidores, densificantes, etc.

2.1 FUNCIONES DE LOS LUBRICANTE

El objetivo principal de los aditivos lubricantes está ligado a la disminución del coeficiente de fricción entre la sarta y la formación formando películas o brindando un medio mecánico capaz de modificar el medio y permitir una interacción sin interrupciones que lideren a tiempos no productivos o problemas operacionales de mayor envergadura, lo anterior es observable en la disminución de los esfuerzos de torsión y arrastre generados sobre la tubería durante la operación conllevando así al aumento de la media de tiempo en que las brocas y equipos en fondo tienen un óptimo funcionamiento.

De igual manera los aditivos en conjunto con la mezcla proveen un medio capaz de difundir el calor proveniente del rozamiento entre las partes móviles de la sarta y la formación, asegurando así un medio adicional de prevención contra el daño prematuro de los arreglos de tubería a lo largo del pozo.

El desempeño de los lubricantes líquidos es apreciable en fluidos base agua teniendo en cuenta que potencializa el desempeño de la mezcla, mientras que los fluidos base aceite son naturalmente lubricados dada su composición, razón por la que se acude a medios mecánicos que pudieran mejorar dicha característica innata en la mezcla.

2.2 PRUEBAS A LOS ADITIVOS LUBRICANTES

Los lubricantes como parte de su naturaleza contienen la propiedad de reaccionar con los diferentes pares que están en solución y/o mezcla en el fluido, por lo cual es necesario evaluar las situaciones que pueden ocasionar un cambio en el lodo o en el lubricante y a la larga afectara la perforación, dentro de los posibles efectos que puede haber lo más urgentes de analizar son los que afectan las principales funciones del fluido; La reología, la trasmisión de potencia hidráulica, y brindar una presión para controlar la formación mediante la densidad del fluido son las funciones más críticas y todas ellas se ven afectadas directamente por la posible generación de espuma en una reacción entre los lubricantes y los otros aditivos

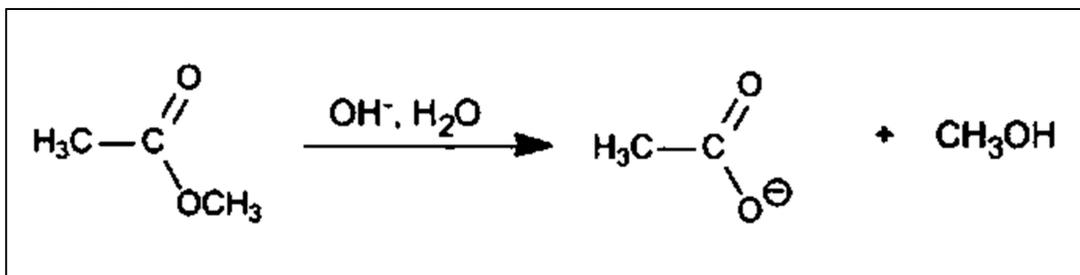
del fluido o incluso la misma fase continua. Esta espuma puede darse por una reacción de saponificación en la cual al encontrarse en un medio básico reaccione con el lubricante generando un carboxilato alcalino, los cuales son conocidos comúnmente como jabones, los cuales presentan dos efectos; el primero y directamente relacionado con lo mencionado, la generación de espuma efecto que traería como consecuencia la disminución inmediata de la densidad pues incluiría una fase gaseosa al fluido, la cual por su misma condición posee una densidad mucho más bajo del que muchas veces es requerido.

El segundo efecto es la posible emulsión entre trazas de agua o aceite de acuerdo al fluido presente en las formaciones y la fase continua del fluido generando con ello una contaminación del fluido la cual en campo no es fácilmente separable.

2.2.1 Saponificación. La reacción típica de saponificación recibe de manera más específica la definición de hidrólisis básica, se da cuando un éster se hidroliza en medio básico dando lugar a un carboxilato para tal fin se origina primero la hidrólisis del éster.

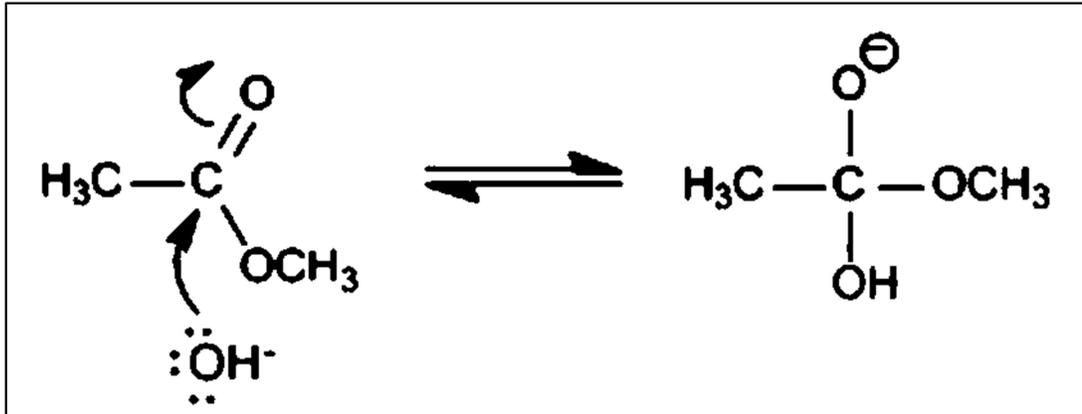
En la **Ecuación 10** se observa para el caso del etanoato de metilo en el cual en un medio acuoso se da la hidrólisis y permite la formación del grupo carboxilato, dicha reacción se lleva a cabo en tres etapas en la cuales se tiene inicialmente la adición del ion hidroxilo al carbonilo, dejando con ello una carga negativa en uno de los oxígenos, lo anterior se evidencia en la **Ecuación 11** que se presenta a continuación.

Ecuación 10. Hidrólisis de éster en medio acuoso



Fuente: FERNÁNDEZ, German. Hidrólisis básica de ésteres. Saponificación [en línea]. Disponible en <<http://goo.gl/rbq3yU>> [Consultado 26/02/2016]. Modificado por los autores

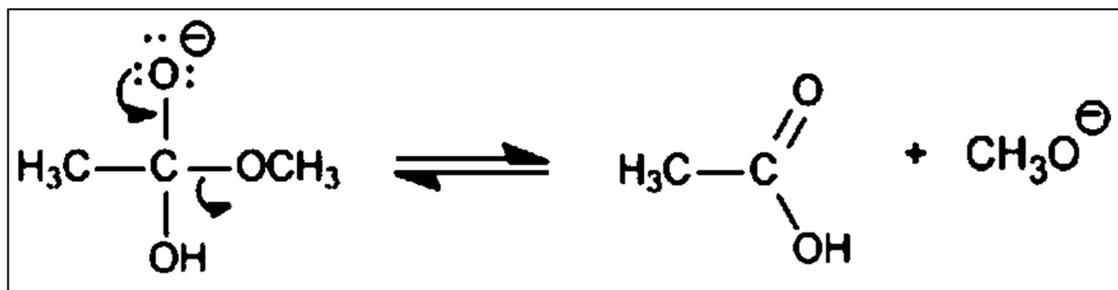
Ecuación 11. Adición del hidroxilo al carbonilo



Fuente: FERNÁNDEZ, German. Hidrólisis básica de ésteres. Saponificación [en línea]. Disponible en <<http://goo.gl/rbq3yU>> [Consultado 26/02/2016]. Modificado por los autores

La segunda etapa se da mediante la eliminación de la cadena adyacente al oxígeno neutro, a causa del cambio de carga del oxígeno negativo al de la cadena, con esto se obtiene parcialmente un ácido carboxílico y el óxido propio de la cadena liberada, esto se evidencia en la **Ecuación 12** presentada de la siguiente manera

Ecuación 12. Eliminación del metóxido



Fuente: FERNÁNDEZ, German. Hidrólisis básica de ésteres. Saponificación [en línea]. Disponible en <<http://goo.gl/rbq3yU>> [Consultado 26/02/2016]. Modificado por los autores

Como etapa final se tiene que el lado derecho de la reacción anterior establece un equilibrio en el cual el óxido, se vuelve un alcohol y se da lugar al ion carboxilato el cual en presencia de un metal como el sodio da lugar a un carboxilato de sodio, el cual al estar dentro de fluidos produce espuma como un jabón.

La prueba consta en tomar una muestra del aditivo a utilizar y llevar a un medio básico con NaOH o algún otra base fuerte, luego calentar y al producto obtenido proceder a mezclarlo con agua y agitar vigorosamente, esto permite observar la presencia o no de espuma, indicando si se ha formado una sal metálica de un ácido carboxílico, y por lo tanto se puede dar a lugar alguno de los efectos mencionados anteriormente.

2.3 GENERALIDADES DE LOS TRES TIPOS DE ADITIVOS LUBRICANTES

Dependiendo del tipo de fluido de perforación que se tenga y las características propias de la operación de perforación, se procede a elegir un diferente tipo de lubricante, y es de suma importancia tener una caracterización básica del elegido puesto que su naturaleza fisicoquímica incide en el fluido, por tal motivo conocer algunos tópicos básicos de los tres tipos de aditivos que son de pertinencia del presente estudio

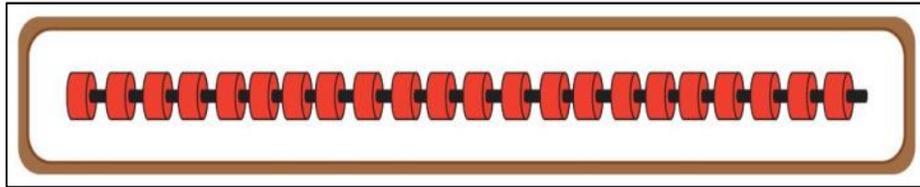
2.3.1 Polímeros. Un polímero es una macromolécula en la cual, unidades iguales llamadas monómeros se repiten dando lugar a una cadena, estas unidades y la manera como se enlazan y distribuyen dan lugar a las propiedades y peso molecular de la molécula. Los monómeros se unen a través de un proceso químico llamado reacción de polimerización, dando lugar a una estructura que se repite a lo largo de la cadena llamada unidad constitucional repetitiva o unidad monomérica, entre más unidades tenga más largo es el polímero y tendrá un mayor grado de polimerización (X).

No todos los monómeros de la cadena deben ser iguales y dependiendo de si son iguales se pueden considerar como homopolímeros o copolímeros, y para que se considere como un monómero una molécula debe poseer más de un grupo funcional. Como parte de ello la estructura formada puede optar por tener forma lineal, ramificada o cíclica. Tomando como referencia lo expuesto por Hermeida²², existen diversos tipos de polímeros clasificados según su origen, la estructura de la cadena y su respuesta termo-mecánica de la siguiente manera:

- **Según su origen:** De carácter natural aquellos que consisten en compuestos producidos por seres vivos los cuales son empleados sin ningún cambio, mientras que los de origen sintético constan en ser producidos por el ser humano, en dos ramas los termorígidos que no pueden fundirse ni solubilizarse y al ser calentados se descomponen, y los termoplásticos que al calentarse se ablandan o funden y son solubles.
- **Según la estructura de la cadena:** Hace referencia a la forma que posee la cadena es decir la distribución de sus unidades monoméricas, obteniéndose una forma lineal, ramificada, entrecruzada, homopolímero o copolímeros. Se presenta a continuación una representación de cada estructura en las **Figuras 6, 7, 8, 9 y 10.**

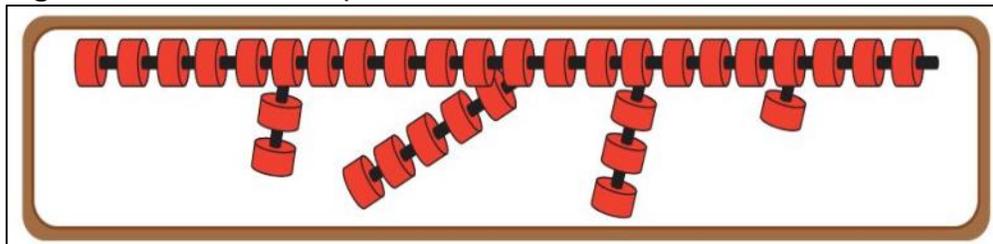
²² HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

Figura 6. Estructura de polímero lineal



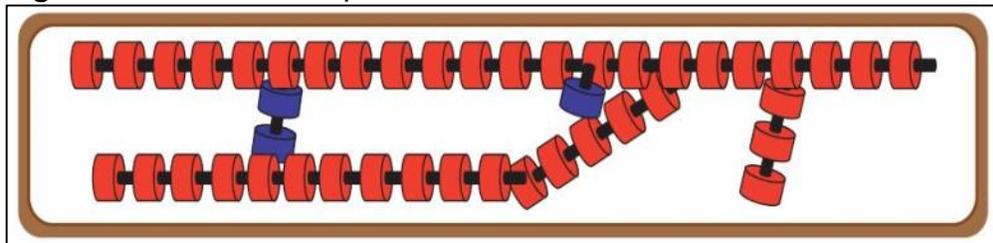
Fuente: HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

Figura 7. Estructura de polímero ramificado



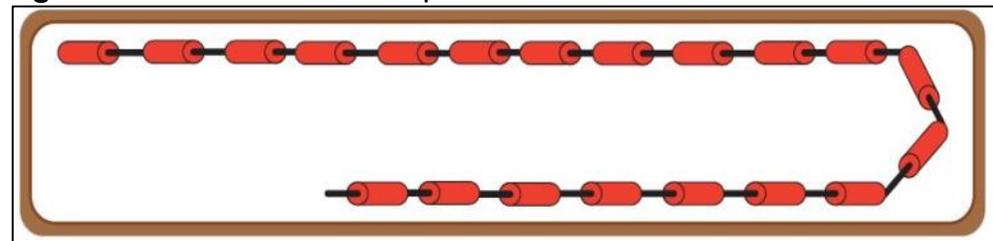
Fuente: HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

Figura 8. Estructura de polímero entrecruzado



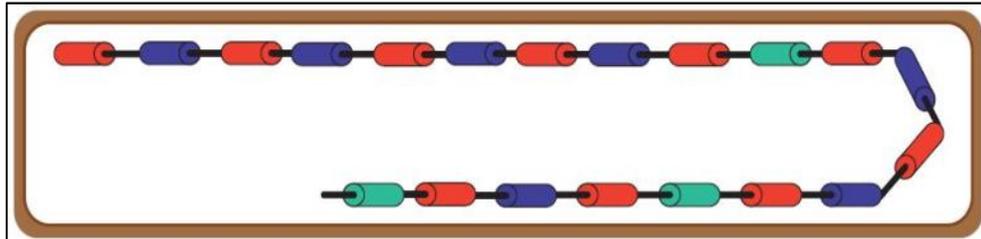
Fuente: HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

Figura 9. Estructura de homopolímero



Fuente: HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

Figura 10. Estructura de copolímero



Fuente: HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

Las distintas estructuras otorgan propiedades distintas y requieren métodos de polimerización distintos, teniendo con ello costos asociados mayores o menores de acuerdo al caso.

- **Según su termo-mecánica:** Como se mencionó previamente se tienen los termoplásticos y termorígidos los cuales poseen las características descritas, con la adición de que los primeros son de carácter lineal y los segundos debido a los enlaces químicos que existen en su interior les da entrecruzamiento o reticulación impidiendo que sean reutilizados luego de ser elaborados.

De manera alterna existen los elastómeros los cuales constan de compartir características de los anteriormente mencionados pues regresan a su forma original luego de ser sometidos a esfuerzos (plasticidad), pero pueden perder gradualmente esta propiedad con la aplicación constante de trabajo; los adhesivos los cuales mantienen esta propiedad conservando una baja cristalinidad y cohesión en sí mismo, los recubrimientos mantienen las mismas características que los adhesivos con una resistencia adicional a la abrasión y finalmente las fibras las cuales son usadas para tejerse o enlazarse como el nylon y poliéster.

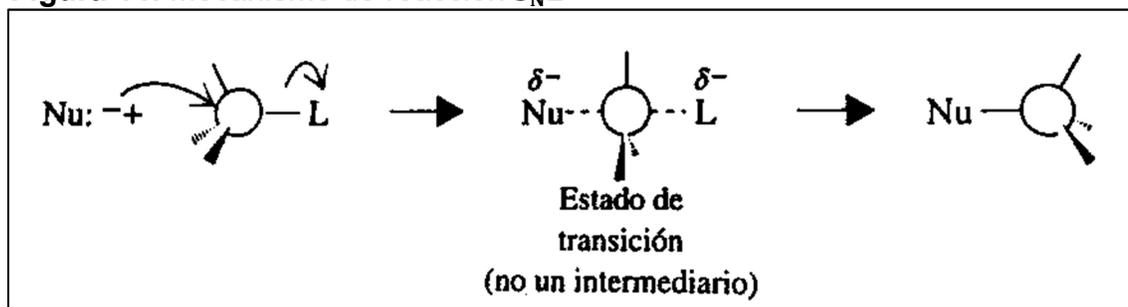
2.3.1.1 Obtención. Dependiendo del tipo de polímero deseado se utilizan dos procesos de polimerización diferentes los cuales constan de la unión de unidades monoméricas mediante la condensación o adición de las mismas, en ambos métodos se dan diferentes tipos de polímeros con un mecanismo de síntesis que sigue a la naturaleza de los grupos funcionales de sus unidades monoméricas, lo anterior de la siguiente manera:

- **Polimerización por condensación.** La mayoría de reacciones de condensación constan de una reacción en la cual mediante sustitución nucleofílica bimolecular (S_N2), es decir según Graham²³ mediante la aproximación del nucleófilo por la parte posterior al carbono que lleva el grupo saliente, reemplazándolo. Dicha reacción se da a causa de que el nucleófilo otorga la energía suficiente para la

²³ GRAHAM, T.W. Fundamentos de química orgánica. México. 1999. p. 254.

separación del grupo saliente, y además propicia una velocidad de reacción alta en la cual no se requiere un estado intermedio, sino un estado de distribución inestable donde tanto el nucleófilo como el grupo saliente están enlazados al carbono llamado estado de transición, lo anterior se puede observar en la **Figura 11** presentada a continuación

Figura 11. Mecanismo de reacción S_N2

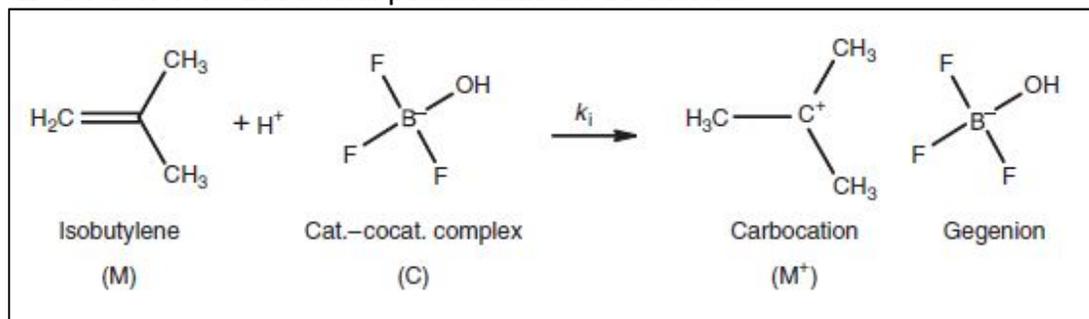


Fuente: GRAHAM, T.W. Fundamentos de química orgánica. México. 1999. p. 254. Modificado por los autores.

Lo anterior con la reacción entre un ácido y una base de Lewis, este tipo de polimerización lo usan las reacciones de síntesis de poliésteres, policarbonatos, poliamidas, poliimidaz y poliuretanos. Como principal hecho de diferencia se tiene que el grupo saliente hace que la molécula resultante no sea igual al monómero de conformación.

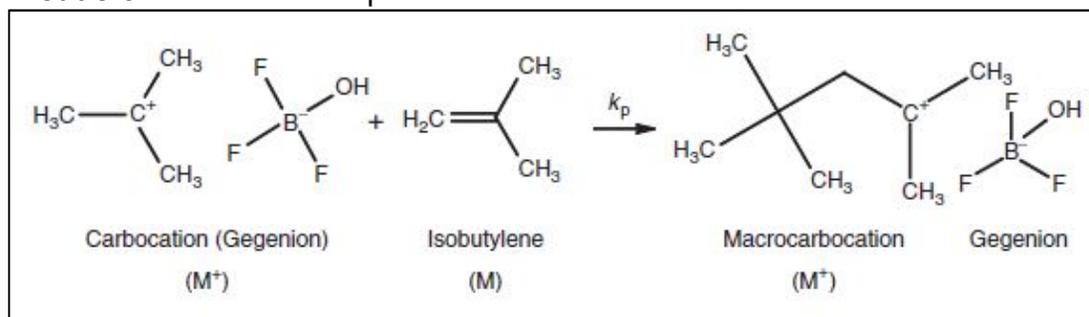
- **Polimerización con adición:** Esta reacción se da por la presencia de un radical libre, un catión o un anión el cual actúa como catalizador que provoca la pérdida de un electrón en el nucleófilo, uniéndose a otro de manera secuencial y develando una de las características principales de esta polimerización, la conservación de la masa molecular del polímero como la suma de la masa de los monómeros que lo conforman, adicionalmente dependiendo de si son de carácter igual o diferente se da origen a los homopolímeros o copolímeros, consta en tres fases nombradas iniciación, propagación y terminación; en la primera fase se da la distribución de cargas producto del catión, anión o radical libre, en la fase de propagación sin que se produzca una unión se da un complejo entre el catión-anión-radical y un ion de carga contraria para mantener la estabilidad eléctrica, y en la terminación se libera el ion y se une el monómero con carga al siguiente monómero que ya está en capacidad de recibirlo formando la cadena y dejando lugar a el siguiente monómero, dicha polimerización está representada en las **Ecuaciones 13 y 14**.

Ecuación 13. Fase inicial polimerización de adición



Fuente: CARRAHER, Charles. Seymour-/Carragher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.137. Modificado por los autores

Ecuación 14. Fase final polimerización de adición



Fuente: CARRAHER, Charles. Seymour-/Carragher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.138. Modificado por los autores.

Dicha adición se da en dos etapas en las cuales en la primera se genera un carbocatión que posteriormente procede a unirse al siguiente dando lugar al polímero.

2.3.1.2 Propiedades. El mecanismo de síntesis que posee cada tipo de polímero origina algunas de las propiedades que el mismo puede presentar, y dado que la naturaleza del polímero viene definida por sus unidades monoméricas y la extensión de la cadena, de acuerdo con Carragher²⁴ algunas de las propiedades de los polímeros más conocidos son condensadas en el **Cuadro 2**.

²⁴ CARRAHER, Charles. Seymour-/Carragher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p. 89; p.158.

Cuadro 2. Propiedades de algunos polímeros comunes

Nombre	Propiedades
Poliamidas	Elasticidad, resistencia a la humedad, al desgaste mecánico y por solventes químicos, al igual que dureza.
Poliuretanos	Resistencia al impacto, flexibilidad y a la abrasión, en el caso de espumas una alta resistencia con un bajo peso.
Poliésteres	Elevada resistencia a productos químicos y capacidad de recuperar su forma luego de deformación, baja absorción de humedad.
Policarbonatos	Los cristales presentan estabilidad térmica y a la oxidación, con ausencia de color y propiedades mecánicas buenas.
Polietilenos	Dependiendo del largo de la cadena se deforman entre 104°F y 185°F, y se oxidan relativamente rápido con respecto a otros polímeros degradándose con ellos.

Fuente: CARRAHER, Charles. Seymour-/Carragher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.89. Modificado por los autores.

Luego de lo anteriormente dicho es pertinente denotar que de acuerdo a la necesidad que se tenga, el polímero debe ser elegido y obtenido por el método correspondiente asegurando con ello cubrir las necesidades, para el caso puntual de los fluidos de perforación las propiedades referidas a la reología que aportan al fluido, la capacidad de absorber agua, y su interrelación con la fase continua del fluido y la roca, lugar donde las funciones de lubricación tiene objetivo.

2.3.1.3 Usos. Dentro de los posibles usos que se le dan a los polímeros también la gama es muy diversa y depende directamente del tipo de polímero conforme a las propiedades de las unidades monoméricas que lo conforman, de esta manera se puede observar algunos de los usos más relevantes para cada polímero según lo expuesto por Carreher²⁵ en el **Cuadro 3**.

²⁵ Ibid., p. 89.

Cuadro 3. Usos de algunos polímeros comunes.

Nombre	Uso
Poliamidas	Son usadas como su máximo exponente el nylon en la industria textil y como sustituto de engranajes, rodamientos,
Poliuretanos	Se usan para recubrimientos, materiales de equipo automovilístico.
Poliésteres	En los textiles juegan un papel preponderante, por su facilidad para hacer fibras.
Policarbonatos	Películas de protección, elaboración de recubrimientos para joyas.
Polietilenos	La gran mayoría de plásticos de productos alimenticios, en embalaje, etc.

Fuente: CARRAHER, Charles. Seymour-/Carraher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.89. Modificado por los autores.

2.3.2 Glicoles. Es un compuesto orgánico caracterizado por la presencia de dos grupos hidroxilo (OH^-) en su cadena carbonada. Estos alcoholes pueden considerarse como dioles geminales o vecinales, donde su principal diferencia radica en la posición del grupo hidroxilo, si los dos se encuentran en átomos adyacentes adquieren el nombre de vecinales y si ambos hacen parte de un mismo átomo en la cadena se denominan geminales.

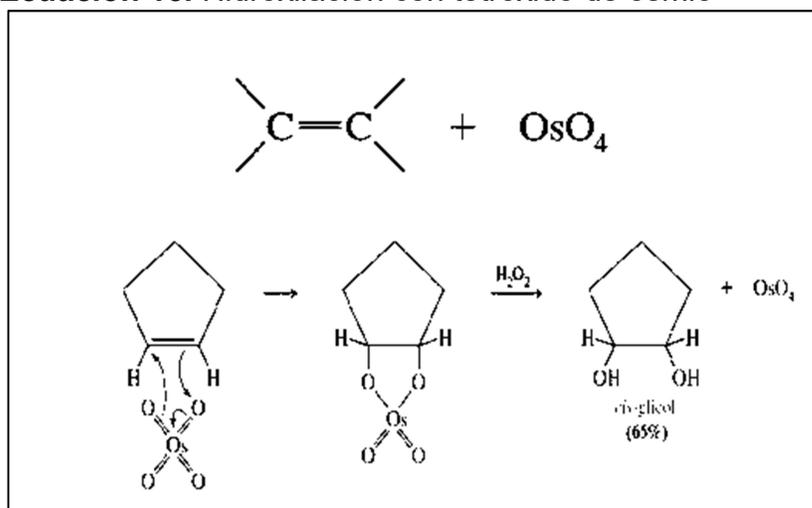
2.3.2.1 Obtención. Industrialmente existen múltiples mecanismos químicos a través de los cuales obtener glicol, algunos de ellos son explicados por Thortnton²⁶ se explican a continuación así:

- **Hidroxilación de alquenos.** Se logra a partir de hidrocarburos insaturados, principalmente alquenos y el uso de agentes oxidantes, es decir, un compuesto químico que mediante la obtención de electrones se reduce, dando lugar a la oxidación del enlace π mediante la adición del grupo hidroxilo en cada carbono participante del enlace oxidado.

²⁶ THORTNTON MORRISON, Robert. Química orgánica. Quinta edición. Nueva York : New York University, Prentice Hall, 1996. p. 298-300, 331-332, 633, 705-706.

- **Hidroxilación con tetróxido de osmio.** Mediante el uso de tetróxido de osmio (OsO_4) se hace reaccionar el hidrocarburo insaturado dando lugar a la formación de un éster cíclico (éster ósmico), el cual reacciona en presencia de un segundo agente oxidante tal como el peróxido de hidrogeno, el cual mediante el aporte de sus hidrógenos al éster forma los grupos hidroxilo, los oxígenos restantes dan lugar a la restauración del tetróxido de osmio el cual debe continuar su ciclo hasta hidroxilar la totalidad del alqueno, dicha reacción es evidenciada en la **Ecuación 15**.

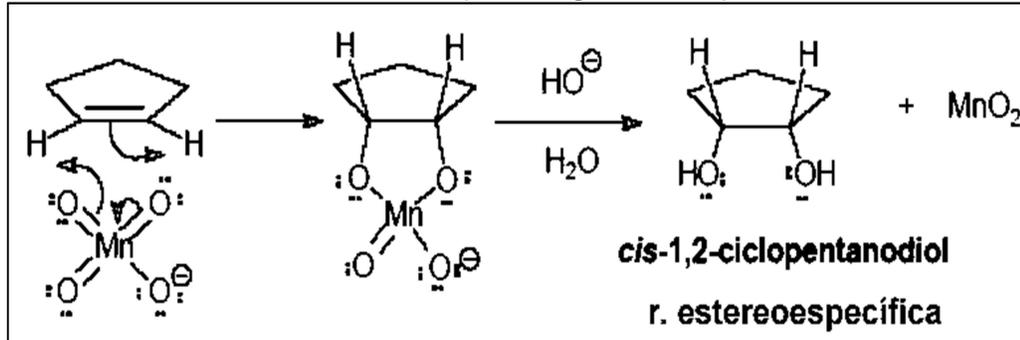
Ecuación 15. Hidroxilación con tetróxido de osmio



Fuente: FRANCISCA CABRERA ESCRIBANO. Lección 14. Alquenos III [diapositivas]. Universidad de Sevilla, 2007. 14 diapositivas, color.

- **Hidroxilación con permanganato de potasio.** El permanganato de potasio ($KMnO_4$) es adicionado y reacciona con las olefinas dando lugar a un éster de manganato el cual al encontrarse en un medio básico genera cis-1,2-ciclopentanodiol y precipita óxido mangánico MnO_2 , en procura de mantener el óptimo desempeño de la reacción se debe evitar la adición de ácidos o calor siendo estos factores que no favorecen el proceso, dicho procedimiento se ve evidencia en la **Ecuación 16**.

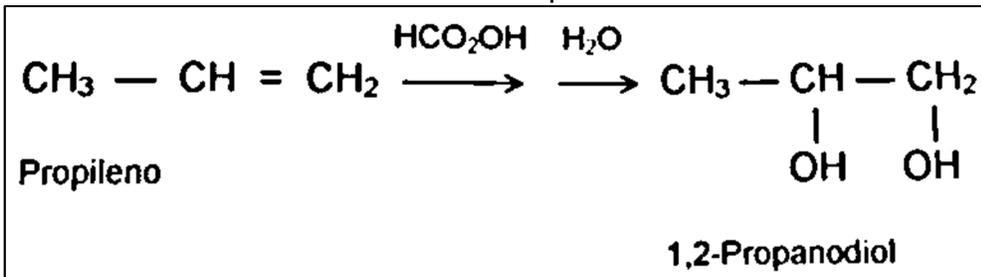
Ecuación 16. Hidroxilación con permanganato de potasio



Fuente: CABRERA, Francisca. Lección 14. Alquenos III [diapositivas]. Universidad de Sevilla, 2007. 14 diapositivas, color.

- **Hidroxilación con ácido peroxifórmico.** Su reacción se produce mediante la mezcla de peróxido de hidrogeno y ácido fórmico (HCOOH), el producto de dicha reacción es calentado en agua y empleado para hidrolizar compuestos intermedios y dar lugar a la generación del glicol mismo, como se muestra en la **Ecuación 17.**

Ecuación 17. Hidroxilación con ácido peroxifórmico

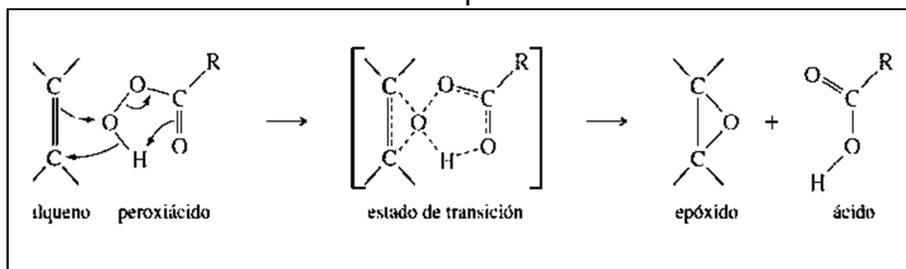


Fuente: THORTNTON MORRISON, Robert. Química orgánica. Quinta edición. Nueva York : New York University, Prentice Hall, 1996. p. 298.

- **Hidrólisis.** La hidrólisis consta de la descomposición o desnaturalización de una sustancia a causa de su contacto con agua, lo cual da a lugar a que cambie y se genere unidades más pequeñas en el caso de las sustancias poliméricas o ácidos y bases débiles en el caso de sales, de pendiendo de la sustancia a hidrolizar habrá un camino de reacciones aprovechable para la producción de glicoles, de acuerdo a la sustancia utilizada algunos tipos de hidrólisis son:
- **Hidrólisis de epóxidos.** Los epóxidos al entrar en contacto con hidronio (iones formados de la adición de un ácido al agua, los cuales dan lugar a un exceso de iones de hidrogeno H^+ y presentan la configuración H_3O^+) adquieren un protón debilitando los enlaces entre el carbono y el oxígeno, actuando este último como un nucleófilo, es decir, aquel compuesto que cede un par de electrones libres

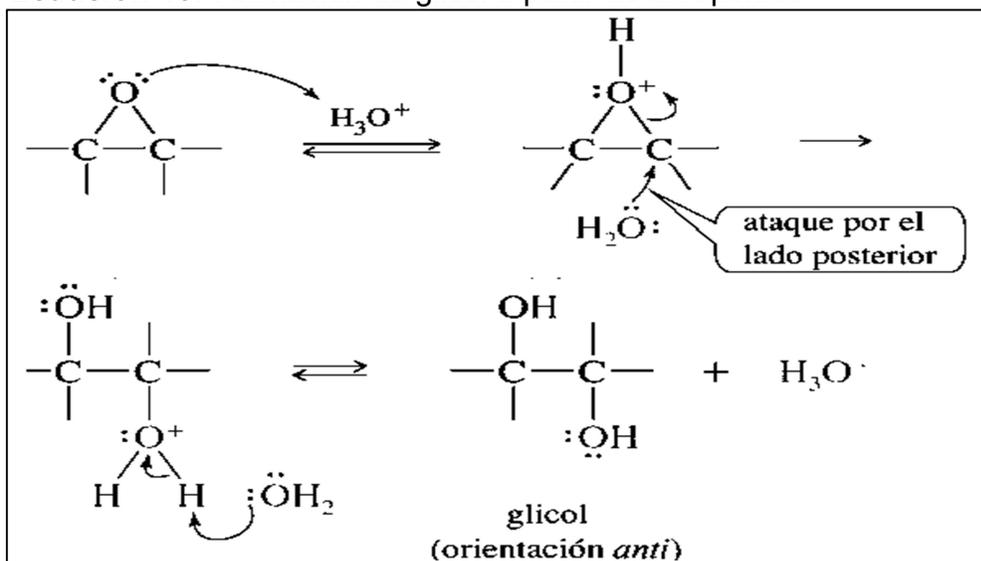
dando lugar a una transición en que se forma un enlace parcial adicional entre la molécula de agua y uno de los carbonos, que conlleva así a una interacción con el agua del medio que permite la generación del diol y la regeneración del hidronio nuevamente, todos el proceso es mostrado mediante los dos pasos indicados en las **Ecuaciones 18 y 19**.

Ecuación 18. Formación de un epóxido



Fuente: Universidad de Zaragoza. Química orgánica para ingenieros, tema 13. Alquenos II [diapositivas]. Universidad de Sevilla, 2007. 106 diapositivas, color.

Ecuación 19. Formación de glicol a partir de un epóxido



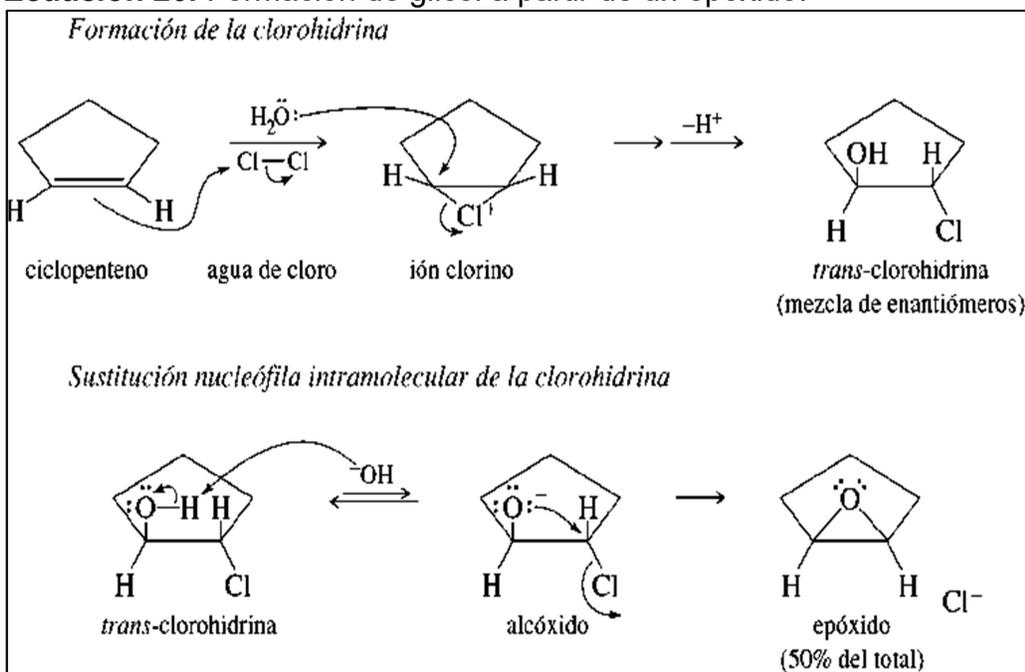
Fuente: Universidad de Zaragoza. Química orgánica para ingenieros, tema 13. Alquenos II [diapositivas]. Universidad de Sevilla, 2007. 106 diapositivas, color.

- **Hidrólisis de halogenuros.** La formación de la clorohidrina se da debido al tratamiento de las olefinas en soluciones acuosas con presencia de agentes halógenos (ejemplo de ello son el agua de cloro o el agua de bromo). Uno de los átomos sea cloro, bromo u otro se adiciona y abre paso a la formación de un ion cloruro (Cl^-), el agua de la fase acuosa se enlaza con uno de los carbonos

permitiendo la formación del hidróxido en el ciclo, dando lugar a la clorohidrina y liberando iones de hidrógeno (H^+).

Posteriormente la clorohidrina se hace reaccionar en un medio básico, donde el ion hidroxilo del medio captura el hidrógeno presente en el hidroxilo de la misma, dando lugar a la formación de agua, dando lugar a un oxígeno con seis electrones libres y cargado negativamente, este mismo al actuar como un nucleófilo cede dos de ellos y permite la liberación del cloro del compuesto, permitiendo así la formación de un epóxido el cual reacciona tal como se muestra previamente en la hidrólisis de epóxidos ... **Ver Ecuación 19...**; para la formación del glicol a partir del halogenuros se indica la reacción en la **Ecuación 20**.

Ecuación 20. Formación de glicol a partir de un epóxido.



Fuente: Farmacia y Bioquímica. Éteres y epóxidos. [en línea]. Disponible en internet: <<http://goo.gl/AA5oxT>> [Consultado el 02.02.2016]. Modificado por los autores.

2.3.2.2 Propiedades. Los glicoles son sustancias que presentan gran facilidad para la formación de enlaces de hidrógeno, los cuales se generan debido a la interacción entre un átomo electronegativo (ejemplo de ello son el oxígeno (O) y el nitrógeno (N)) y el hidrógeno, debido a la presencia del ion hidroxilo presentan dicha disposición y forman los enlaces consigo mismo, sin embargo dicha propiedad también le otorga la posibilidad de formarlos con el agua, permitiendo al glicol ser soluble en la misma.

De acuerdo a la Facultad de ciencias de la Universidad de Granada: “entre todas las interacciones electrostáticas que no involucran formación de iones, aquellas en las que participa el hidrógeno son las más fuertes”²⁷ ello ligado al concepto de punto de ebullición, permite concebir un mayor requerimiento de energía para permitir el rompimiento de los enlaces y por lo tanto un aumento en el valor del punto de ebullición de la sustancia al encontrarse disuelta en agua.

De igual modo los alcoholes polihidroxiados presentan el denominado punto de nube, siendo este la temperatura a la cual el glicol deja de ser soluble completamente, se caracteriza por la aparición de leves gotas o microemulsiones en los fluidos base agua; considérese que los glicoles tienen una tendencia a solubilizar a temperaturas relativamente bajas. Esta propiedad está directamente ligada a factores tales como la salinidad de la mezcla, la densidad y la concentración del glicol en sí mismo, evidenciado en la disminución de la temperatura del punto de nube con el incremento de alguna de las propiedades previamente mencionadas.

2.3.2.3 Usos. El glicol es una sustancia empleada frecuentemente en multiplicidad de industrias, siendo el monoetilenglicol, dietilenglicol, propilenglicol tres de los derivados más comunes y de mayor implicación en diferentes procesos, los dos primeros encontrados en la industria textil, de cosméticos e incluso la farmacia. En la industria textil el monoetilenglicol se hace reaccionar con ésteres y ácidos que dan lugar a fibras como el politereftalato de monoetilenglicol de alta resistencia y empleo para el desarrollo de prendas u otro tipo de elementos. Ahora bien, también es posible encontrar su aplicación en el desarrollo de películas fotográficas así como la generación de envases plásticos de productos alimenticios.

De acuerdo con Oxiteno²⁸ es de aclarar que el compuesto etilenglicol presenta una baja volatilidad lo que no lidera a intoxicación por inhalación de la sustancia, sin embargo una atmósfera saturada con la misma podría resultar nociva. De igual modo habrá que tener sumo cuidado con el contacto en los ojos o la piel por un periodo prolongado, ayudándose de un lavado con abundante agua para el óptimo retiro de la sustancia y así evitar lesiones permanentes, en referencia al consumo

²⁷ UNIVERSIDAD DE GRANADA. 4- Interacciones por enlaces o puentes de hidrógeno. En: Estructura de Macromoléculas. España. p. 37

²⁸ OXITENO, Boletín técnico Glycol. Brasil:s.n. 2015

de la sustancia se estiman alrededor de 100ml como una dosis letal de la sustancia, puesto que el organismo le metaboliza en un compuesto denominado ácido oxálico el cual afecta directamente a los riñones del ser humano causando la muerte la muerte del mismo. Como complemento se tiene que el etilenglicol tiene otros campos de acción ejemplo de ello es la ingeniería automotriz en donde hacer parte de los fluidos anticongelantes teniendo en cuenta que su punto de fusión es considerablemente bajo (-15,6°C).

Así mismo el dietilenglicol es una sustancia líquida, no corrosiva y viscosa, capaz de disolverse en agua y otros disolventes (con excepción del benceno y tolueno) presenta usos como agente lubricante de fibras naturales como el algodón y la lana, de igual modo es ampliamente empleado en la industria de la refinación de hidrocarburos haciendo parte esencial de los procesos de deshidratación del gas natural. En la industria de los hidrocarburos el glicol es ampliamente utilizado como agente inhibidor de arcillas en los fluidos de perforación, esto es apoyado con el concepto de punto de nube denotado previamente da lugar a las emulsiones de lodo activadas térmicamente, ello implica un cambio en las propiedades de los fluidos debido a alteraciones en la temperatura, que actúan en el pozo brindando estabilidad al mismo desde el punto de vista del filtrado así como el revoque.

Teniendo en cuenta que las temperaturas de fondo son considerablemente altas, la tendencia del glicol es a desprenderse del agua y formar la película sobre las formaciones reactivas, esto logrado mediante la obturación matricial de la formación reactiva generada debido a la adsorción del aditivo sobre la misma, disminuyendo a su vez la permeabilidad así como el filtrado de fluido.

Debe tenerse en cuenta que debido a los cambios de temperatura parte del glicol se encuentra insoluble y su calidad en el filtrado es menor dando lugar a un fluido de perforación con una calidad de inhibición menor y por tanto haciendo a la formación más propensa al hinchamiento.

Así mismo habrá un efecto sobre los ripios perforados especialmente aquellos en cuya composición haya presencia de arcillas reactivas o aquellas provenientes de la formación en sí misma, parte del glicol es adsorbido por los fragmentos quienes debido a su previa interacción con la broca tienen una temperatura alta y contribuyen a la separación del glicol de la mezcla base agua formando una película sobre el detrito que le protege y debido a sus características viscosas contribuye al acarreamiento del mismo hasta alcanzar las fases superficiales en donde se vuelve a generar una disolución del componente en el fluido, sin hacer necesario un tratamiento a los ripios y reutilizando el componente mismo para posteriores fases de la perforación, contribuyendo no sólo económicamente desde el punto de vista de tratamientos y limpiezas sino reduciendo los impactos ambientales que la deposición del glicol pudiera generar.

2.3.3 Lubricantes mecánicos. Conjunto de materiales sólidos empleados en los fluidos de perforación como agentes reductores del coeficiente de fricción, normalmente asociados a cuerpos huecos así como rígidos de forma esférica, los cuales actúan directamente en la interacción de la sarta y la formación conllevando a un mejor desempeño del fluido y los equipos durante las operaciones de perforación. El efecto causado en el espacio anular creado por la tubería y la formación es el mismo que se emplea en rodamientos, donde dos cuerpos concéntricos giran de manera libre mediante la presencia de cuerpos esféricos en medio.

2.3.3.1 Obtención. Las microesferas pueden ser de vidrio o cerámica, las primeras se componen principalmente de una mezcla de soda, cal y silicatos de boro, estos últimos normalmente encontrados en la industria del vidrio, y que en conjunto da propiedades adecuadas al material para ser insoluble al agua o el aceite, así como la capacidad de soportar altas presiones, temperaturas y condiciones adversas que el pozo pudiera brindar.

2.3.3.2 Propiedades. De acuerdo a la ficha técnica de Transmerquim de Colombia, S.A.²⁹ las esferas son material particulado de color blanco y/o grisáceo, el cual carece de olor y no presenta ningún grado de solubilidad. Su densidad puede variar desde $0,15 \text{ g/cm}^3$ hasta $0,6 \text{ g/cm}^3$, su pH de trabajo es neutro-básico (entre 7 y 8,5) con una concentración 1M a 20°C, sus características le hacen una sustancia higroscópica implicando así que las esferas tienen la capacidad de absorber la humedad del ambiente que les circunda.

2.3.3.3 Usos. De acuerdo a 3M³⁰ las microesferas de vidrio son normalmente empleadas en la industria de los hidrocarburos, desempeñándose en las ramas de cementación o perforación según fuere la finalidad en la operación. En la primera de ellas, brindan un medio capaz de reducir las posibilidades de pérdidas de circulación y daño a la formación, de igual modo proveen un medio óptimo capaz de hacer ínfima la posibilidad de cementaciones remediales, aumentando de igual manera la eficiencia en la remoción de lodo, haciendo efectiva la adherencia y posterior fraguado del cemento en la formación.

Dentro de los fluidos de perforación además de contribuir al desarrollo de operaciones bajo balance y conllevando a la reducción de presión diferencial dentro del pozo, da lugar a incrementos en la tasa de penetración de la broca, reducción de pegadas diferenciales así como daños a la formación. Debido a la

²⁹ TRANSMERQUIM DE COLOMBIA, S.A. Certificado de análisis, esferas cerámicas >35MPa. Bogotá D.C., Colombia, p. 2

³⁰ 3M. Use of 3M Glass bubbles in drilling fluids – General guidelines. USA. 2012.

naturaleza inerte del compuesto no se degrada ante la presencia de agentes químicos, así mismo permite la generación de fluidos de hasta 5,5 libras por galón en fluidos de perforación y menor a 9,2 libras por galón en lechadas de cemento con características reológicas estables, así como una capacidad de soporte de altas presiones (hasta 6000 lpc) y altas temperaturas (hasta 500°F según las características, propiedades y especificaciones de las esferas de vidrio).

Como efecto secundario las esferas de vidrio presentan características lubricantes, debido a la forma de las mismas y su afinidad en el cuerpo poroso, dando así un medio idóneo para reducir la interacción sarta-formación, reduciendo los esfuerzos de torsión y arrastre que pudieran presentarse durante las operaciones, especialmente en aquellas que involucren pozos con alta angulosidad en su diseño. De igual manera estos aditivos se desempeñan en otras industrias, ejemplo de ello es la industria de pinturas en donde son usadas para el desarrollo de productos con menor densidad así como menor viscosidad y una mayor resistencia a las altas presiones que le permitan a los recubrimientos tener un mejor desempeño ante condiciones de temperatura más adversas, aumentando la resistencia a la misma a partir de la reducción de la conductividad térmica de la sustancia.

Dentro de otro conjunto de actividades, las esferas de vidrio son empleadas en la industria de la construcción (desarrollo de masillas y mezclas especiales de mármol), la industria de la minería también emplea dicho aditivo en procura de dar mezclas explosivas más estables ante los efectos de compresión y posible coalescencia de las partículas de la mezcla al encontrarse en periodos de reposo prolongado. La industria automotriz y de aviación en procura de aumentar la eficiencia de los medios de transporte, busca el desarrollo de materiales más livianos sin dejar de lado su funcionalidad, resistencia y competencia, por lo cual algunas de sus partes reducen la densidad en un 30%, haciendo de las partes más flexibles y útiles, conllevando a la reducción de emisiones directamente relacionado con el aumento en la eficiencia del uso de los combustibles y brindando incremento del desempeño y velocidad de los vehículos.

3. PRUEBAS DE LABORATORIO

En procura de determinar el efecto en las propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación base agua y base aceite, de los aditivos mencionados en el apartado de generalidades de los aditivos... **Ver 2.3...** se realizó la formulación de tres (3) lodos en cada base, es oportuno señalar que para efectos de la experimentación se dispuso de que cada barril correspondería a un barril equivalente de 350 mL y cada libra tendría un equivalente de 1 g, continuando con la formulación se tuvo como primer discriminante la densidad que los mismos tendrán, para con esto poder tener un punto de referencia en cada parte del espectro de las densidades más comunes usadas dentro del área de la perforación, para tal fin se formularon densidades de 8,5 ppg, 10 ppg y 13 ppg. De manera adicional las formulaciones hicieron lo posible por dar escenarios diversos los cuales permitieran evaluar el efecto de cada aditivo en condiciones simples para un fluido de perforación, tal como fluidos limpios, sin arcillas y cuya reología fuese regida por la goma xantano y la celulosa polianiónica, además de tener inhibidores de arcilla en pequeñas cantidades lo cual es usual durante la elaboración de fluidos de perforación, dichas formulaciones son numeradas de la siguiente manera: Formulación 1, Formulación 2, Formulación 3 para los fluidos base agua y Formulación 4, Formulación 5, Formulación 6 para los fluidos base aceite.

A continuación se presentaran las formulaciones propuestas y los resultados obtenidos de la medición de los parámetros viscosidad plástica, punto cedente y resistencia al gel en cuanto a reología, alcalinidad, cloruros, filtrado API y dureza total en el panel de pruebas químicas para el filtrado y finalmente como parámetro de mayor relevancia para el presente proyecto el coeficiente de fricción, todo lo anterior a medida que se ve aumenta la concentración de cada aditivo lubricante de manera individual sobre cada formulación.

3.1 FORMULACIONES FLUIDOS BASE AGUA

Para las presentes formulaciones se usó ambos agentes densificantes representativos de la industria (Barita , Carbonato de calcio) a fin de alcanzar las densidades necesarias y de manera alterna tener dos posibilidades de evaluación, también es pertinente mencionar que los aditivos utilizados para cada base son de características distintas, esto debido a la naturaleza de la base, en el caso de las formulaciones base agua los aditivos utilizados son solubles o forman una suspensión en agua y más importante aún son compatibles con la misma. Las formulaciones respectivas son presentadas a continuación.

3.1.1 Formulación 1. Esta formulación está realizada para alcanzar una densidad de trece (13) libras por galón, la concentración está dada por barril y la dosificación discriminada está dada para la elaboración de tres barriles, para este caso se utilizó de base 787,89 lb de agua y 705,96 lb de barita de gravedad específica de 4,2 como material densificante. En la **Tabla 1** se muestra la concentración (lb/gal), la gravedad específica de cada aditivo y la dosificación pertinente para 3 bbl de fluido.

Tabla 1. Formulación fluido base agua 13 ppg

No	Producto	Gravedad específica	Concentración (lb/bbl)	Masa (lb)
1	Amortiguador de pH - Soda cáustica	2,04	0,05	0,15
2	Goma xantano	1,05	1	3
3	Celulosa polianiónica	1	2,5	7,5
4	Inhibidor de arcillas 1	1	5	15
5	Agente puenteante	2,7	25	75
6	Inhibidor de arcillas 2	1,06	2	6
7	Controlador de filtrado	1	5	15
8	Glutaraldehído	1	0,5	1,5
9	Lignosulfonato de cromo	1,3	3	9

3.1.2 Formulación 2. En esta formulación se realizó una modificación al no utilizar como material densificante barita, sino carbonato de calcio dado que la densidad del fluido deseada era de diez (10) libras por galón, la concentración está dada por barril y la dosificación especificada para la elaboración de seis (6) barriles, lo anterior con el fin de contar con suficiente fluido para realizar todas las pruebas necesarias, para este caso se utilizó de base 1861.44 lb de agua y 534.86 lb de carbonato de calcio M300 de gravedad específica de 2,77 como material densificante, los aditivos utilizados con mostrados en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Formulación fluido base agua 10 ppg

No	Producto	Gravedad específica	Concentración (lb/bbl)	Masa (lb)
1	Amortiguador de pH - Soda cáustica	2,04	0,05	0,3
2	Viscosificante - Goma xantano	1,05	0,8	4,8
3	Celulosa polianiónica	1	2,5	15
4	Inhibidor de arcillas	1	2	12
5	Inhibidor de arcillas 2	1,06	6	36
6	Agente puenteante	2,7	20	120
7	Controlador de filtrado	1	4	24

El cambio en la cantidad de fluido preparado para la fase experimental se debe a la necesidad de corroborar mediciones y con ello dar mayor veracidad a los datos obtenidos y con ello a los posteriores resultados y análisis.

3.1.3 Formulación 3. Esta formulación aspira a emular las condiciones de un fluido utilizado para zonas de interés, donde es crítico el daño que se le pueda generar a la formación, adicionalmente es comparable con el uso de salmueras, la densidad requerida para el mismo es de ocho punto cinco (8,5) libras por galón, a manera de otorgar características reológicas más representativas al fluido se prefirió como agente viscosificante goma xantano, de igual manera los cálculos de dosificación se realizaron para preparar seis (6) barriles de fluido, con una base de 2088 lb de agua, para esta dosificación no se recurrió a ningún agente densificante puesto que con los aditivos utilizados se alcanzaría la densidad requerida, dichos aditivos son mostrados en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Formulación fluido base agua 8,5 ppg

No	Producto	Gravedad específica	Concentración (lb/bbl)	Dosificación (lb)
1	Amortiguador de pH - Soda cáustica	2,04	0,05	0,3
2	Goma xantano	1,05	2	12

La soda cáustica (NaOH) se agrega con el fin de alcanzar un pH básico para que la goma xantano se incorpore al agua, puesto que en condiciones neutra o acidas no solo no diluiría sino se vería comprometida su integridad.

3.2 FORMULACIONES FLUIDOS BASE ACEITE

Para estas formulaciones los productos elegidos dependían de que cumplieran con condiciones de compatibilidad con la base, debido a que la misma es de carácter apolar y presenta por sí mismo una viscosidad, en cuanto a la variación de las formulaciones se vio restringido por las dificultades con respecto al tratamiento requerido por el fluido base aceite para disponerlo luego de realizadas las pruebas, por tal motivo las formulaciones tienen muchos tópicos en común variando únicamente en la cantidad de aditivo densificante, usándose tanto carbonato de calcio como barita de acuerdo a la densidad requerida a obtener.

3.2.1 Formulación 4. En esta formulación debido a la alta densidad necesario (13 ppg) se empleó tanto barita como carbonato de calcio, en cuanto a este último se recurrió a dos tipos granulometría distintos M300 y M200 usados respectivamente como material densificante y material puenteante, en cuanto a la cantidad de base utilizada, se usó 214 lb de diésel, adicionalmente como material densificante 275 lb de barita y 340 lb de carbonato cuyas gravedades específicas corresponden a las mencionadas durante el transcurso de las formulaciones...**Ver 3.1**...Todo lo anterior para la elaboración de un barril, en el caso de la presente formulación se presentan los aditivos en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Formulación fluido base aceite 13 ppg

No	Producto	Concentración (lb/bbl)	Masa (lb)
1	Arcilla organofílica	11	11
2	Cal hidratado	7	7
3	Emulsificante	7	7
4	Modificador reología de alta	2	2
5	Humectante de roca	3	3
6	Controlador de filtrado soluble en aceite	4	4

Como se puede observar se cambian los aditivos utilizados con el fin de que sean compatibles con la base del fluido.

3.2.2 Formulación 5. Para este fluido solo se procedió con carbonato de calcio M300 como material densificante y se tuvo como cantidad a preparar un barril de fluido, para tal fin se utilizó 214 lb de diésel y del carbonato mencionado anteriormente 157,36 lb, respecto a los aditivos utilizados son expuestos en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Formulación fluido base aceite 10 ppg

No	Producto	Concentración (lb/bbl)	Masa (lb)
1	Arcilla organofílica	11	11
2	Cal hidratado	7	7
3	Emulsificante	7	7
4	Modificador reología de alta	2	2
5	Humectante de roca	3	3
6	Controlador de filtrado soluble en aceite	4	4

En esta formulación al tener por completo como agente densificante el carbonato de calcio se puede evaluar si tiene algún efecto el uso de este como único densificante o la existencia de barita en el lodo da lugar a un comportamiento distinto de propiedades e interacción con los aditivos lubricantes.

3.2.3 Formulación 6. En el fluido de menor densidad la cantidad de material densificante requerido es muy pequeña puesto que los aditivos otorgan densidad al mismo, aparte de las características propias de cada uno, los aditivos utilizados en su dosificación indicada se encuentran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Formulación fluido base aceite 8,5 ppg

No	Producto	Concentración (lb/bbl)	Dosificación (lb)
1	Arcilla organofílica	11	11
2	Cal hidratado	7	7
3	Emulsificante	7	7
4	Modificador reología de alta	2	2
5	Humectante de roca	31	31
6	Controlador de filtrado soluble en aceite	41	41

Como se mencionó anteriormente es de resaltar que las formulaciones son muy similares puesto que se procedió a densificar un fluido de características similares pero como es irrefutable de diferente densidad, para estas tres últimas formulaciones al densificar se observó que el fluido adquiriría características

propias de un fluido no newtoniano, debido a que se comportaba como un sólido y al aplicarle un esfuerzo de corte adquiriría propiedades de un líquido.

3.3 RESULTADOS PRUEBAS DE LABORATORIO

Una vez se definieron los fluidos sobre los cuales se realizaría la experimentación se procedió a dosificar las cantidades necesarias de cada aditivo lubricante para la poliacrilamida y el glicol se debe resaltar que ambos componentes no se encuentran como un compuesto puro dentro del aditivo utilizado, sino que son parte de una mezcla descrita como un aceite derivado del petróleo y poliacrilamida para el primer caso y una mezcla de esteres y glicol para la segunda referencia, lo anterior debido a que los aditivos como se explicó en el apartado de aditivos...**Ver 1.4**...pueden tener más de una función dentro de un fluido de perforación, parte del presente proyecto desarrolla la posibilidad de implementar los aditivos como un factor directo en el manejo de la lubricidad durante las operaciones de perforación, la dosificación de estos se dio conforme se determinó en la delimitación del presente proyecto en concentraciones de 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5%, 3% expresado en %V/V, en cuanto al lubricante mecánico si fue utilizado de manera pura manteniendo una dosificación correspondiente al 0%, 10%,20%, 30% y 40 % expresado en %V/V , dichos porcentajes expresados sobre el máximo recomendado por el fabricante de un 10%V/V, dicha recomendación se debe a la eficiencia del aditivo resultado de características físicas particulares del mismo, lo anterior como parte inicial de las premisas del presente proyecto.

En referencia a los aditivos utilizados con cada tipo de fluido, continúan las premisas que darán lugar a la justificación de las restricciones en cuanto a pruebas y uso de los aditivos lubricantes, puesto que no todos presentaban compatibilidad con la base para el caso de los lodos base aceite solo se implementaron las esferas de vidrio, que al ser de carácter inerte no presentaban ningún problema para la integridad del fluido, de manera alterna las pruebas desarrolladas se vieron restringidas por la presencia de sólidos, con un tamaño de partícula superior a 200 μm , para el caso de las pruebas reológicas dado que implican descalibrar el equipo utilizado para tal fin ...**Ver 1.2.2**...; similarmente las pruebas químicas no fueron realizadas sobre los fluidos base aceite a causa de que para realizarlas es necesario contar con el filtrado y para fluidos base aceite se acomete de acuerdo al procedimiento establecido para pruebas *High Pressure-High Temperature* (HPHT), lo cual no es competencia del presente proyecto. Con tales restricciones expuestas se procede a la presentación de los resultados (reología, pruebas químicas y lubricidad) para cada formulación, los cuales estarán directamente influenciados por las premisas, puesto que conducirán los mismos entornos a las propiedades fisicoquímicas que se desean evaluar.

3.3.1 Resultados - Formulación 1. En este apartado se presentaran las mediciones obtenidas para la reología en cuanto a viscosidad plástica, punto cedente y resistencia gel, las mediciones tomadas de alcalinidad, cloruros y dureza total y finalmente el coeficiente de lubricidad. En la **Tabla 7** se presenta los datos de PV, YP y resistencia gel obtenidos a medida se iba incrementando la concentración de glicol en el fluido, al igual que el cambio en la densidad con dicho incremento, un aumento en la viscosidad plástica induce en dificultades a la hora de bombear los fluidos durante la perforación, y aunque se produce un aumento del YP, es menor que el generado utilizando poliacrilamida como se puede observar en la **Tabla 8**.

Tabla 7. Reología y densidad para la formulación 1 con glicol

GLICOL	Concentración (%V/V)	0%	0,50%	1%	1,50%	2%	2,50%	3%
	Densidad (ppg)	12,7	12,65	12,6	12,55	12,5	12,45	12,4
	Resistencia Gel (lb/100ft ²)	7,2	7,5	7,4	7,3	7,7	8,0	8,7
	PV (cP)	20,33	27,8	23,4	24,4	26,7	28,3	31,4
	YP (lb/100ft ²)	49,84	36,8	44,2	42,6	51,8	49,2	47,5

El uso del glicol en la formulación 1 trae un incremento en la resistencia gel del 20% cuando se alcanza la máxima dosificación evaluada, de manera adicional un incremento en la viscosidad plástica conllevando esto a una mayor resistencia a fluir a medida que se incrementa la concentración de glicol, de manera alterna el punto cedente oscila entre 36.8 lb/100ft² y 51.8 b/100ft².

Tabla 8. Reología y densidad para la formulación 1 con poliacrilamida

POLIACRILAMIDA	Concentración (%V/V)	0%	0,50%	1%	1,50%	2%	2,50%	3%
	Densidad (ppg)	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
	Resistencia Gel (lb/100ft ²)	7,2	9,6	10,6	14	15,7	12,9	12,1
	PV (cP)	20,33	24,6	23,7	23,3	26,4	28,2	30,1
	YP (lb/100ft ²)	49,84	37,8	44,5	54,4	56,4	58,3	56,6

De manera símil se presentan las propiedades mencionadas conforme se cambia la concentración de poliacrilamida, se observa como a medida que aumenta la concentración del aditivo la viscosidad del fluido se ve incrementada dando con ello un punto de especial cuidado puesto que se podría ver comprometida las ROP durante una operación de perforación , más sin embargo también se ve incrementado el punto cedente con lo cual la capacidad de limpieza del pozo se

vería favorecida y remediaría en aumento en la viscosidad plástica; En referencia a las propiedades químicas se presenta a continuación los resultados para el fluido limpio y una vez alcanzadas las máximas concentraciones de cada aditivo lubricante, se hizo de esta manera a fin de obtener un cambio observable en las propiedades del fluido, cosa que de evaluar en cada cambio de concentración no sería apreciable, los cambios evidenciados son presentados para cada propiedad **Tabla 9.**

Tabla 9. Pruebas Químicas - Formulación 1

	Fluido limpio	Glicol (3%)	Poliacrilamida (3%)	Esferas de vidrio (3%)
pH	9,5	9,53	9,5	9,5
Filtrado API (cc/30min)	6,7	4	4,5	5,8
Pf (cc/cc)	0,66	0,5	0,6	0,47
Mf (cc/cc)	2,46	3	2,45	2,57
Cl- (ppm NaCl)	2970	4191	2970	3135
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	250	50	240	150

Se puede observar como la alcalinidad del fluido se ve afectada por el uso del glicol, al igual que un considerable aumento en la salinidad del filtrado con respecto a la salinidad del lodo limpio, en contra parte la disminución en la dureza del fluido evidencia una interacción con el mismo, dicho cambio se explica mediante la formación de espuma cuando se utilizaba el glicol, este se da por la saponificación de la parte estérica y del glicol del aditivo lo cual, genera una carboxilato de sodio, dicho fenómeno es explicado en el numeral 2.2.1. En cuanto al filtrado se ve una reducción con el uso del glicol y la poliacrilamida puesto que el aumento en la viscosidad origina una resistencia al fluido a pasar por el medio filtrante.

En cuanto a los resultados obtenidos con respecto al coeficiente de fricción observado por la adición de cada aditivo lubricante en el fluido, se cuentan con lecturas cada minuto del torque, más sin embargo la determinación de dicho coeficiente está dada por la lectura del minuto cinco (5), el seguimiento discreto de las lecturas permitió darle validez a las mismas puesto que mostraba precisión en las lecturas obtenidas, con una baja variabilidad producto de efectos del equipo o de quien realiza la medición, además de contar para cada serie de lecturas con un factor de corrección de lecturas previamente realizadas con agua destilada. A continuación se presenta los datos correspondientes al coeficiente de fricción con cada aditivo en las **Tablas 10 y 11.**

Tabla 10. Coeficiente de fricción con glicol y poliacrilamida - Formulación 1

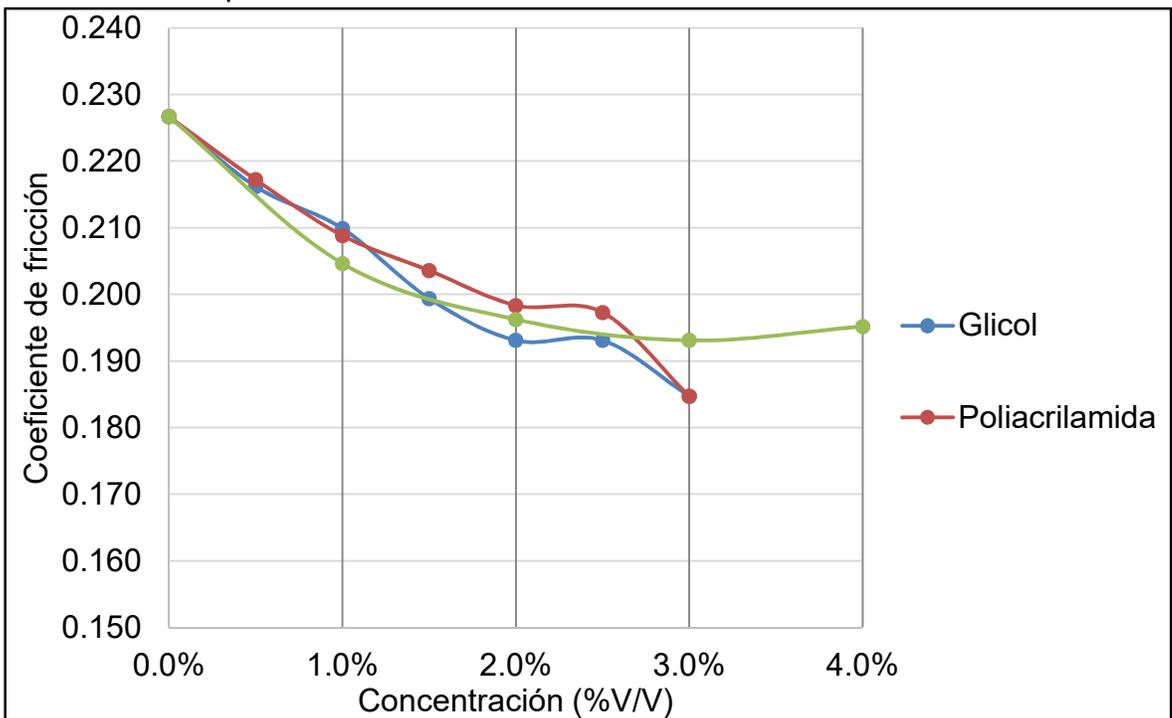
	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	Factor de corrección
Glicol	0,227	0,216	0,210	0,199	0,193	0,193	0,185	1,049
Poliacrilamida	0,227	0,217	0,209	0,204	0,198	0,197	0,185	1,049

Tabla 11. Coeficiente de fricción con esferas de vidrio - Formulación 1

	0%	1%	2%	3%	4%	Factor de corrección
Esferas de Vidrio	0,227	0,205	0,196	0,193	0,195	1,049

Es consistente la reducción en el coeficiente de fricción conforme se aumenta la concentración de cada agente aplicado, obteniendo una reducción absoluta mayor en los escenarios regidos por glicol y poliacrilamida llegando al mismo valor para ambos casos, con una rapidez más alta en el caso del glicol, por lo cual con respecto solo al coeficiente de fricción sería más eficiente, en el caso de las esferas de vidrio si bien se obtiene una reducción no es tan alta y al ser in solido ya supone una reducción en la capacidad de soportar solidos del fluido la cual es de vital importancia a la hora de la limpieza del pozo, el comportamiento del coeficiente de fricción con el cambio de la concentración de cada aditivo se muestra en la **Gráfica 1**.

Gráfica 1. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulación 1



Se observa el comportamiento decreciente de coeficiente de fricción, con cada aditivo, con una marcada disminución de la reducción en el caso de las esferas de vidrio con lo cual, se puede inferir se ha alcanzado la concentración de saturación con dicho aditivo, en cuanto al glicol y la poliacrilamida se alcanzó la misma reducción a una razón de cambio distinta, la cual es tomada en cuenta para la determinación futura del aditivo, más adecuado para la formulación.

3.3.2 Resultados – Formulación 2. En este apartado se presentaran las mediciones obtenidas para la reología en cuanto a viscosidad plástica, punto cedente y resistencia gel, las mediciones tomadas de alcalinidad, cloruros en ppm de NaCl, dureza total y últimamente el coeficiente de lubricidad. En la **Tabla 12** se presenta los datos de viscosidad plástica, punto cedente, resistencia gel y densidad obtenidos a medida se iba incrementando la concentración de glicol en el fluido, un aumento en la viscosidad plástica induce en dificultades a la hora de bombear los fluidos durante la perforación, y aunque se produce un aumento del YP la compensación es mucho menor a la observada en un fluido de mayor densidad ,y sigue siendo menor que el generado utilizando poliacrilamida como se puede observar en la **Tabla 13**.

Tabla 12. Reología y densidad con glicol - Formulación 2

GLICOL	Concentración (%V/V)	0%	0,50%	1%	1,50%	2%	2,50%	3%
	Densidad (ppg)	9,8	9,73	9,7	9,60	9,5	9,47	9,4
	Resistencia Gel (lb/100ft ²)	5,1	5,3	6,1	6,0	5,7	6,0	6,0
	PV (cP)	12,50	14,7	22,3	27,4	14,7	16,8	25,8
	YP (lb/100ft ²)	20,90	19,0	26,4	12,8	22,9	26,4	15,4

Con el uso del glicol en la formulación 2 se evidencia una reducción en la densidad conforme aumenta la concentración del mismo, dicho incremento también se presenta en la resistencia gel y de una manera más amplia en la viscosidad plástica, en referencia al punto cedente se mantiene la oscilación de la propiedad obteniéndose con ello una compensación del aumento de viscosidad platica mediante la estabilidad del punto cedente.

Tabla 13. Reología y densidad con poliacrilamida - Formulación 2

POLIACRILAMIDA	Concentración (%V/V)	0%	0,50%	1%	1,50%	2%	2,50%	3%
	Densidad (ppg)	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
	Resistencia Gel (lb/100ft ²)	5,1	5,3	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
	PV (cP)	12,5	13,5	17,4	16,35	15,3	15,4	15,5
	YP (lb/100ft ²)	20,9	18,9	19	19,6	20,2	21,55	22,9

Igualmente se presentan las propiedades mencionadas conforme se cambia la concentración de poliacrilamida, se observa como a medida que aumenta la concentración del aditivo la viscosidad del fluido se ve incrementada dando con ello un efecto similar al mencionado para la formulación 1, más sin embargo también se ve incrementado el punto cedente con lo cual la capacidad de limpieza del pozo se vería favorecida y supliría en aumento en la viscosidad plástica, en este caso el incremento es mayor significando con ello no solo un beneficio en el coeficiente de fricción sino una estabilidad en las propiedades reológicas no solo por lo anteriormente mencionado, sino por el incremento mínimo en la resistencia gel del fluido lo cual mantendría la capacidad de sostén para sólidos del mismo; En referencia a las propiedades químicas se presenta a continuación en la **Tabla 14**, los resultados para el fluido limpio y una vez alcanzadas las máximas concentraciones de cada aditivo lubricante, bajo la misma premisa mencionada para la anterior formulación.

Tabla 14. Pruebas químicas - Formulación 2

	Fluido limpio	Glicol (3%)	Poliacrilamida (3%)	Esferas de vidrio (3%)
pH	9,33	8,65	8,1	8,75
Filtrado API (cc/30min)	5,8	4,8	5,1	5,8
Pf (cc/cc)	0,3	0,3	0,2	0,16
Mf (cc/cc)	1,8	2	1,8	1,4
Cl- (ppm NaCl)	3135	3300	3300	6484,5
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	250	450	400	160

Se puede observar como la alcalinidad del fluido se ve afectada por el uso del glicol en una baja proporción, al igual que un considerable aumento en la salinidad

del filtrado con respecto a la salinidad del lodo limpio, en contra parte la disminución en la dureza del fluido evidencia una interacción con el mismo bajo la misma manera que la explicada anteriormente, con las esferas de vidrio se presenta un fenómeno particular con el aumento en la salinidad del mismo, lo anterior se puede deber a un aporte de sal de las esferas por parte de las misas, las cuales con una agitación excesiva contribuye a la degradación de las esferas y la eliminación de su propiedad inerte. En referencia al filtrado la reducción del mismo con el uso de poliacrilamida y glicol se ve afectada por el aumento en la viscosidad, además de que en la formulación 2 se usó carbonato de calcio lo cual contribuye como material controlador de filtrado y altera la cantidad de filtrado presente respecto a la formulación 1. En cuanto a los resultados obtenidos con respecto al coeficiente de fricción observado por la adición de cada aditivo lubricante en el fluido, se sigue contando con factor de corrección para cada lectura previamente realizadas con agua destilada. A continuación se presenta los datos correspondientes al coeficiente de fricción con cada aditivo en las **Tablas 15 y 16**.

Tabla 15. Coeficiente de fricción con glicol y poliacrilamida - Formulación 2

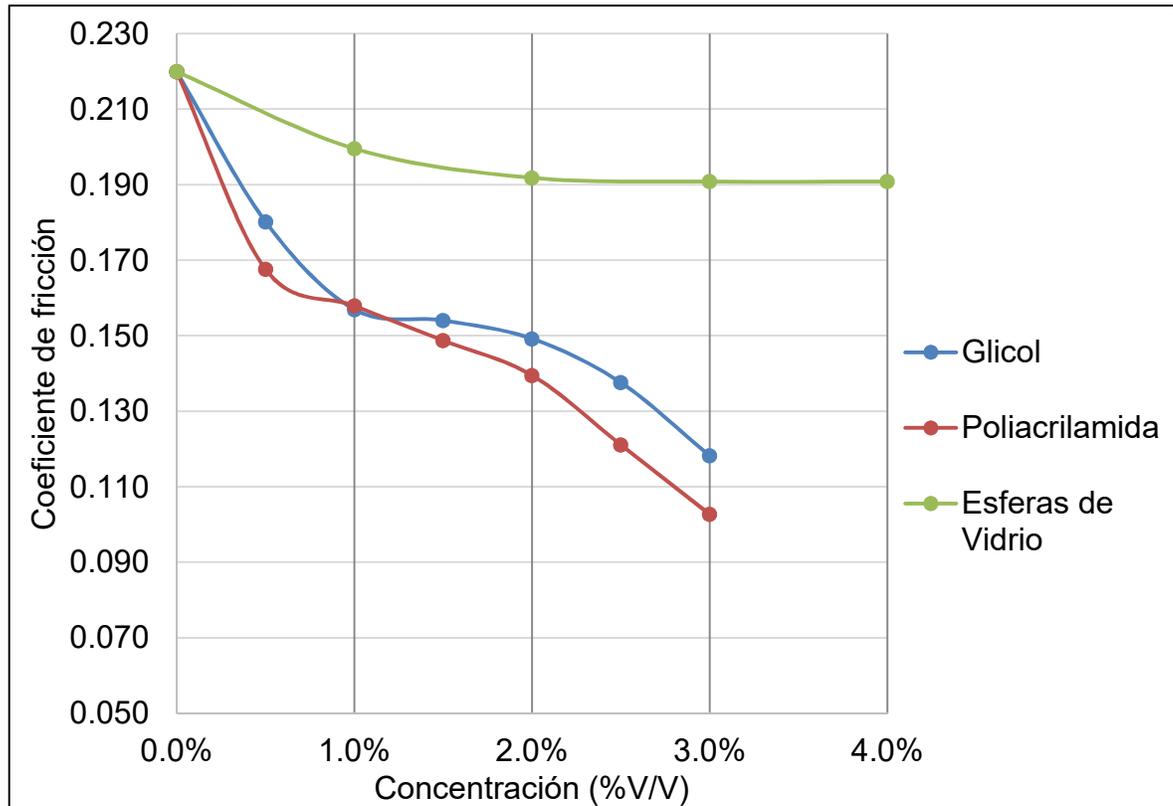
	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	Factor de corrección
Glicol	0,220	0,180	0,157	0,154	0,149	0,138	0,118	0,969
Poliacrilamida	0,220	0,168	0,158	0,149	0,139	0,121	0,103	0,969

Tabla 16. Coeficiente de fricción con esferas de vidrio - Formulación 2

	0%	1%	2%	3%	4%	Factor de corrección
Esferas de Vidrio	0,220	0,200	0,192	0,191	0,191	0,969

Para este caso la mayor reducción en coeficiente de fricción se dio con la adición de poliacrilamida y mostrando desde bajas concentraciones una reducción más efectiva del coeficiente, para las esferas sigue siendo el de menor impacto y con una saturación más temprana, con respecto a la reducción causada del coeficiente de fricción sobre el fluido, dicho comportamiento puede ser evidenciado más claramente en la **Gráfica 2**.

Gráfica 2. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulación 2



3.3.3 Resultados – Formulación 3. En esta sección se presentaran las mediciones obtenidas para la reología en cuanto a viscosidad plástica, punto cedente y resistencia gel, las mediciones tomadas de alcalinidad, cloruros en ppm de NaCl, dureza total y posteriormente el coeficiente de lubricidad.

En la **Tabla 17** se presenta los datos de viscosidad plástica, punto cedente, resistencia gel y densidad obtenidos a medida se iba incrementando la concentración de glicol en el fluido, un aumento en la viscosidad mínimo acompañado por un aumento en el punto cedente, al compararlo con el cambio sufrido con la poliacrilamida se evidencia que si bien existe dicho aumento en PV, el cambio en punto cedente es mucho mayor con el glicol siendo con ello más eficiente, dicha comparación se basa en la información presentada y la suministrada de manera seguida en la **Tabla 18**.

Tabla 17. Reología y densidad con glicol - Formulación 3

GLICOL	Concentración (%V/V)	0%	0,50%	1%	1,50%	2%	2,50%	3%
	Densidad (ppg)	8,40	8,20	8,18	8,13	8,10	8,09	8,06
	Resistencia Gel (lb/100ft ²)	10,8	13,1	11,9	12,4	12,5	13,3	14,1
	PV (cP)	5,20	5,1	5,6	5,9	5,5	7,1	7,1
	YP (lb/100ft ²)	21,00	21,7	22,8	23,8	25,5	25,3	26,4

Al usar glicol en la formulación 3, se obtiene un incremento en la resistencia gel y en la viscosidad plástica, este último compensado por el aumento en el punto cedente que para esta formulación deja de ser oscilante y presenta un incremento en la propiedad, lo cual da lugar a una concentración más alta en la cual se de dicha compensación.

Tabla 18. Reología y densidad con poliacrilamida - Formulación 3

POLIACRILAMIDA	Concentración (%V/V)	0%	0,50%	1%	1,50%	2%	2,50%	3%
	Densidad (ppg)	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
	Resistencia Gel (lb/100ft ²)	10,8	9,5	11	11,2	11,5	11,7	12,1
	PV (cP)	5,2	5,8	4,8	4,8	5,4	5,3	4,9
	YP (lb/100ft ²)	21	18,9	20,6	21,1	20,8	21,5	22,4

A la par se presentan las propiedades mencionadas conforme se cambia la concentración de poliacrilamida, se observa como a medida que aumenta la concentración del aditivo la viscosidad del fluido se ve mantiene y el punto cedente se incrementa en poco más de una unidad, además de que para la resistencia gel el incremento no supera el 10% de la inicial, con esto se comprueba que el efecto en las propiedades reológicas para un fluido tan básico y de baja densidad es prácticamente nulo haciendo con ello, poco eficiente el aditivo para la formulación 3; En referencia a las propiedades químicas se presenta a continuación en la **Tabla 19**, los resultados para el fluido limpio y una vez alcanzadas las máximas concentraciones de cada aditivo lubricante, bajo la misma premisa mencionada para la anterior formulación 1.

Tabla 19. Pruebas químicas - Formulación 3

	Fluido limpio	Glicol (3%)	Poliacrilamida (3%)	Esferas de vidrio (3%)
pH	6,7	6,2	6,4	6,7
Filtrado API (cc/30min)	*	*	*	*
Pf (cc/cc)	0	0	0	0
Mf (cc/cc)	0,2	0,4	0,3	0,25
Cl- (mg/L)	247,5	247,5	165	165
Dureza Total (ppm CaCO ₃)	100	200	100	100

* Dado que la formulación no contaba con ningún otro aditivo aparte de la goma xantano el filtrado fue total y no es pertinente realizar el conteo del mismo, lo anterior al carecer de sólidos, polímeros o cualquier material controlador de filtrado.

Se puede observar como la alcalinidad del fluido se ve afectada por el uso del glicol en una baja proporción, la dureza se aumenta en una proporción baja y mantiene la salinidad en un promedio con respecto al fluido limpio, para los otros dos aditivos los cambios son similares en lo que corresponde a salinidad y dureza tendiendo a la baja. En cuanto a los resultados obtenidos con respecto al coeficiente de fricción observado por la adición de cada aditivo lubricante en el fluido, se sigue contando con factor de corrección para cada lectura previamente realizadas con agua destilada. De manera inmediata se presenta en las **Tablas 20 y 21** los resultados correspondientes al coeficiente de fricción con cada aditivo.

Tabla 20. Coeficiente de fricción con glicol y poliácridamida - Formulación 3

	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	Factor de corrección
Glicol	0,220	0,180	0,157	0,154	0,149	0,138	0,118	0,969
Poliacrilamida	0,220	0,168	0,158	0,149	0,139	0,121	0,103	0,969

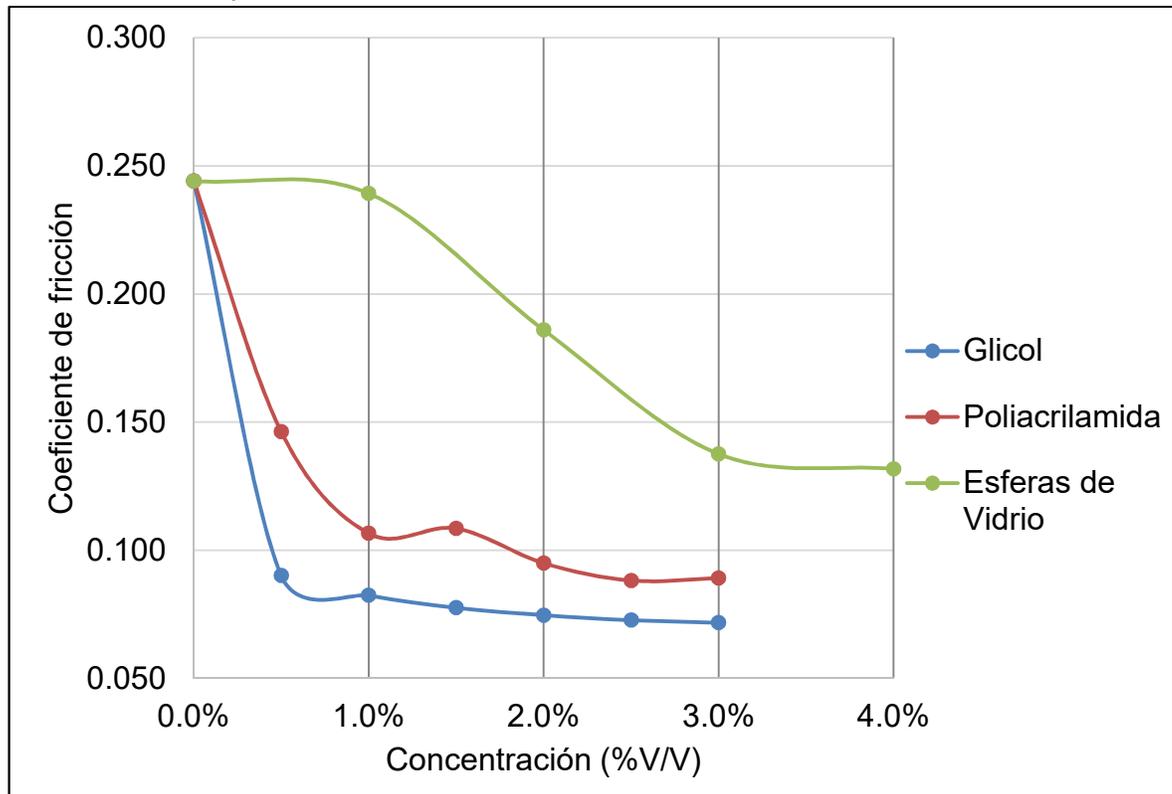
Tabla 21. Coeficiente de fricción con esferas de vidrio - Formulación 3

	0%	1%	2%	3%	4%	Factor de corrección
Esferas de Vidrio	0,244	0,239	0,186	0,138	0,132	1,024

Para este caso la mayor reducción en coeficiente de fricción se dio con la adición de glicol no solo de manera absoluta, sino con un cambio evidenciable con menor concentración del aditivo, y una saturación alcanzada más rápidamente, por lo

cual sería poco eficiente seguir dosificando glicol, la tendencia del glicol y de la dosificación generada por la poliacrilamida y las esferas de vidrio es observada en la **Gráfica 3**, donde aparte de lo explicado se observa, una reducción menor con los otros aditivos lubricantes, manteniendo una cercanía con el coeficiente de fricción alcanzado con la poliacrilamida, para los tres aditivos se llega a una concentración en la cual, el aumento en la concentración no produce un efecto importante en la propiedad.

Gráfica 3. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulación 3



3.3.4 Resultados – Formulación 4. Como se mencionó al inicio del presente capítulo el uso de la poliacrilamida y el glicol en fluidos base aceite no es conveniente puesto que no presenta compatibilidad con la base, para el caso del glicol forma una película inmiscible en el fluido, la cual no solo no aporta ninguna propiedad al fluido sino que da lugar a un contaminante, que cuando durante las operaciones de perforación entre en contacto con agua, se saponificara conforme a lo indicado en varios apartes del presente proyecto, generando espuma que restara densidad al lodo y originara emulsiones indeseadas, los resultados obtenidos con las esferas de vidrio se muestran en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Lubricidad - Formulación 4

Concentración (%V/V)	0%	1%	2%	3%	4%	Factor de corrección
Densidad (ppg)	12,80	12,81	12,85	12,88	12,90	1,046
Coefficiente de fricción	0,1245	0,1276	0,1266	0,1287	0,1287	

Con respecto al coeficiente de fricción que para un fluido base aceite tiene como característica un valor muy bajo al adicionar, las esferas de vidrio se ve afectado dicha propiedad con un aumento que indica como no solo, no aporta ningún beneficio al fluido, sino que da lugar a un perjuicio en la propiedad, teniendo como factor adicional un incremento en el costo del barril de fluido, lo cual para un fluido base aceite es mucho más crítico que en un fluido base agua , pues este tipo de fluidos se caracterizan por precios elevados.

3.3.5 Resultados – Formulación 5. La tendencia de aumentar el coeficiente de fricción se mantiene conforme se adicionan esferas, lo anterior es observable en la **Tabla 23** se debe tener como situación adicional que al ser un sólido, le quita la cantidad de los mismos que puede resistir el fluido, dicha capacidad es de suma importancia en el fluido con una relación directa en su reología.

Tabla 23. Lubricidad - Formulación 5

Concentración (%V/V)	0%	1%	2%	3%	4%	Factor de corrección
Densidad (ppg)	9,10	9,30	9,50	9,70	9,90	1,046
Coefficiente de fricción	0,1151	0,1161	0,1214	0,1193	0,1193	

En lo que compete a la densidad del fluido se ve incrementada por la adición de esferas de vidrio, llegando a un aumento del 8,8% de la propiedad lo cual en grandes volúmenes representaría un adicional de presión hidrostática durante la perforación, poniendo en riesgo la integridad de la operación.

3.3.6 Resultados – Formulación 6. Para un fluido de baja densidad, a pesar de tener una estabilidad mayor en el coeficiente de fricción, muestra una desventaja en la propiedad pues la adición de esferas de vidrio, como se ha venido mencionando en el desarrollo del presente proyecto, no solo compromete la capacidad de transporte de sólidos sino que con el aumento del coeficiente de fricción representa, mayores esfuerzos para la sarta de perforación, lo cual en condiciones donde sería utilizado un lodo de baja densidad, ocasionaría daños en la formación y sobrecostos en la perforación; el cambio del coeficiente de fricción y la densidad por efecto de la adición son consignados en la **Tabla 24**.

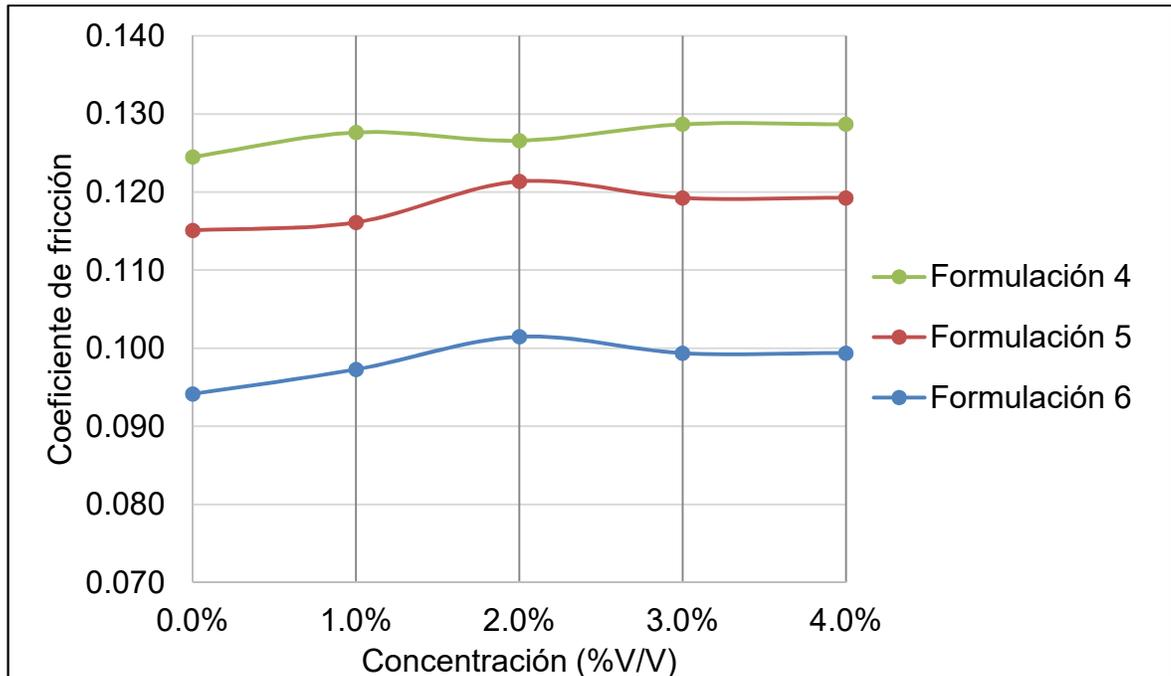
Tabla 24. Lubricidad - Formulación 6

Concentración (%V/V)	0%	1%	2%	3%	4%	Factor de corrección
Densidad (ppg)	8,76	8,77	8,78	8,78	8,79	1,046
Coeficiente de fricción	0,0942	0,0973	0,1015	0,0994	0,0994	

El cambio el coeficiente de fricción es mínimo y presenta un máximo en una concentración del 2%, representado un cambio del 7,8% con relación a la propiedad original, el comportamiento de la propiedad se debe a la homogenización del fluido con cada adición por lo cual se puede establecer un valor cercano a 0,1 para el coeficiente de fricción en este escenario, lo anterior sin salirse del análisis desarrollado a lo largo del capítulo.

El comportamiento correspondiente para las formulaciones base aceite, con respecto a la evaluación realizada, con las esferas de vidrio se obtuvo un comportamiento similar para las tres formulaciones y está representado por la **Gráfica 4**.

Gráfica 4. Comportamiento del coeficiente de fricción - Formulaciones base aceite



Es notable el detrimento en el coeficiente de fricción reportado, a medida que aumenta la concentración de las esferas de vidrio, y por lo tanto se respalda que no representa ninguna mejoría en dicha propiedad, la adición de lubricantes.

3.3.7 Resultados prueba de saponificación. En lo que respecta la prueba de saponificación descrita en el presente proyecto...**Pág. 61**... se obtuvieron los siguientes resultados, para cada uno de los aditivos lubricantes.

- Para la poliacrilamida, al encontrarse en agitación y calentamiento cambio de color a una tonalidad lechosa y una única fase, lo cual indica un emulsión de la base oleica de la poliacrilamida y la fase acuosa básica de la prueba, aparte de ello no se presentó ningún otro cambio, siendo esto un resultado negativo a la prueba de saponificación.
- Para el glicol, hubo un cambio de color de incoloro a blanco y de inmediato comenzó a presentarse la generación de espuma conforme aumentaba la agitación, siendo esto un resultado positivo a la prueba de saponificación.
- Para las esferas de vidrio, no se presentó ningún cambio con lo cual las esferas se fueron al fondo del recipiente, debido a su naturaleza inerte, siendo esto un resultado negativo para la prueba de saponificación.

3.4 MATRIZ DE CONTRASTE

Luego de realizada la evaluación de cada aditivo en las diferentes concentraciones para cada una de las formulaciones, la selección de cual aditivo se ajusta mejor para cada una, se realizó mediante la aplicación de una matriz de contraste la cual consiste en una comparación de las propiedades medidas (Densidad, Viscosidad plástica, Punto cedente, Resistencia gel, Pruebas químicas y Lubricidad) y cada uno de los aditivos, dicha comparación se realiza mediante una calificación que consta en un valor de cero (0) cuando el aditivo causa un efecto negativo o nulo en las propiedad , un valor de cero punto cinco (0,5) cuando tiene un efecto positivo en la propiedad pero no es claramente el mejor efecto y de uno (1) cuando su efecto es muy bueno para la propiedad, al evaluarse seis propiedades la calificación máxima es de seis.

Una vez obtenido para cada formulación cual es el aditivo que mejor desarrollo presenta, se procedió a elegir un aditivo de manera general para cada base, lo anterior con el fin de determinar cuál es el aditivo que durante una operación de perforación mejor se podría adaptar a los diferentes escenarios que se podrían presentar en cuanto a fluidos de perforación, permitiendo su uso a lo largo del espectro de densidades, con un eficiencia suficiente para justificar el costo de su implementación y manteniendo el resto de propiedades del fluido de manera estática o con un cambio negativo compensado por mejorar alguna otra propiedad.

En función de lo anteriormente descrito se presenta las matrices de contraste para cada formulación según la base utilizada (agua y aceite).

3.4.1 Matriz de contraste - Fluidos base agua. Al evaluar las diferentes concentraciones de los aditivos en los fluidos...**Ver 3.3**...se observaron cambios conforme se iba aumentando la concentración, con ello se pudo evaluar los cambios sufridos por cada propiedad y con ello evaluar cuan bueno o malo es el uso del aditivo para la formulación, producto de ello se presenta la matriz mostrada en la **Tabla 25**.

Tabla 25. Matriz de contraste - Fluidos base agua

Formulación 1							
	Densidad	Viscosidad Plástica	Punto Cedente	Resistencia Gel	Química	Lubricidad	Calificación
Glicol	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	2,5
Poliacrilamida	1	1	1	1	1	0,5	5,5
Esferas de Vidrio	0	0	0	0	0,5	0	0,5
Formulación 2							
Glicol	0,5	1	0,5	0,5	0	0,5	3
Poliacrilamida	1	0,5	1	0,5	0,5	1	4,5
Esferas de Vidrio	0	0	0	0	0,5	0	0,5
Formulación 3							
Glicol	0,5	1	1	1	0	1	4,5
Poliacrilamida	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5
Esferas de Vidrio	0	0	0	0	1	0	1

Para la formulación 1 se obtuvo unos mejores resultados con el uso de poliacrilamida, no solo en la calificación total, sino en la gran mayoría de propiedades donde presentó una conservación o mejoría de las propiedades, y en el principal nicho de evaluación, la lubricidad mantiene una competencia directa con el glicol, sin afectar negativamente la reología del fluido ni las propiedades químicas del mismo, para la formulación 2 la idoneidad de los aditivos fue más pareja entre el glicol y la poliacrilamida, con una ventaja en este segundo aditivo de manera global y en la propiedad de más alto impacto para el proyecto, la lubricidad.

Finalmente para el fluido más simple, la formulación 3 se encontró la misma competencia entre la poliacrilamida y el glicol con un mejor perfil en las propiedades reológicas para el glicol, y afectando únicamente el fluido en sus propiedades químicas... **Ver 3.3.3**...obtenido con ello una leve ventaja en su uso sobre la poliacrilamida; luego de realizado el anterior análisis se puede definir como el mejor aditivo lubricante para los fluidos base agua, la poliacrilamida.

3.4.2 Matriz de contraste – Fluidos base aceite. Respaldado por los datos obtenidos en el presente proyecto, se obtiene que para los fluidos base aceite como se discutió previamente la poliacrilamida y el glicol no generan ningún cambio positivo en las propiedades del fluido por lo cual, su valoración en todas las propiedades es de cero (0), lo anterior sumado a falta de información con la cual realizar la valoración respecto a estos dos aditivos, en el caso de la poliacrilamida que se encuentra diluida en una base oleica, al agregarse al fluido base aceite solo implica una dilución más grande del compuesto con lo cual, no genera un efecto medible a nivel de laboratorio. Para el glicol al ser una sustancia de carácter polar no se mezcla con el fluido base aceite de naturaleza apolar, creando una película que no genera efecto en las propiedades del fluido; finalmente en cuanto al uso de las esferas de vidrio se otorgó una valoración de acuerdo a las propiedades evaluadas, como se observó en los resultados... **Ver 3.3**... la adición de esferas no representó una mejoría en las propiedades del fluido sino que en cuanto a lubricidad y densidad, causó un efecto negativo en el fluido, con lo cual se obtiene a manera general una matriz compuesta 100% por ceros, indicando que de los tres aditivos lubricantes del proyecto, ninguno es pertinente para el uso en fluido cuya base sea aceite.

En la **Tabla 26** se ilustra cómo ningún aditivo lubricante de los evaluados en el presente proyecto, se constituye como un aditivo que proporcione una mejora en las propiedades de lubricidad de las formulaciones cuya base es aceite, además de ser por extensión un adicional que comprometería las demás propiedades del fluido.

Tabla 26. Matriz de contraste - Fluidos base aceite

Formulación 4							
	Densidad	Viscosidad Plástica	Punto Cedente	Resistencia Gel	Química	Lubricidad	Calificación
Glicol	0	0	0	0	0	0	0
Poliacrilamida	0	0	0	0	0	0	0
Esferas de Vidrio	0	0	0	0	0	0	0
Formulación 5							
Glicol	0	0	0	0	0	0	0
Poliacrilamida	0	0	0	0	0	0	0
Esferas de Vidrio	0	0	0	0	0	0	0
Formulación 6							
Glicol	0	0	0	0	0	0	0
Poliacrilamida	0	0	0	0	0	0	0
Esferas de Vidrio	0	0	0	0	0	0	0

Para culminar, de acuerdo a los resultados de las pruebas evaluados en la experimentación y su respectivo análisis en las matrices de contraste, se permite establecer los aditivos lubricantes experimentalmente idóneos para cada una de las formulaciones de fluido base agua, lo anterior es condensado en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Aditivos seleccionados para fluidos base agua

Formulación	Aditivo seleccionado
Formulación 1 – 13 ppg	Poliacrilamida
Formulación 2 – 10 ppg	Poliacrilamida
Formulación 3 – 8,5 ppg	Glicol

De igual manera se tiene como precedente la naturaleza lubricante de los fluidos base aceite, justificación primaria bajo la cual se considera el no uso de aditivos lubricantes esto se complementa ya que el glicol en primera instancia forma una película inmisible con el fluido apolar base y adicionalmente al entrar en contacto con agua da a lugar a problemas operacionales tales como saponificación, con lo cual se incurre en disminución de densidad y probables influjos en proyectos a gran escala.

En segundo lugar la base oleica de la poliacrilamida se diluye en el fluido base aceite lo cual no afecta la lubricidad general de las formulaciones base aceite y por lo tanto, no se considera un aditivo significativo a ser implementado en las mismas. Por último las esferas de vidrio denotan de sobremanera un daño a la propiedad principal evaluada en las formulaciones, pues da lugar a un aumento del coeficiente de fricción aspecto indeseable que justifica entre otros aspectos la no utilización del aditivo, por lo cual se concluye para las formulaciones 4, 5 y 6 un perfil de aditivos lubricantes nulo dando así el mejor comportamiento de las propiedades en los fluidos limpios.

4. EVALUACIÓN DE COSTOS

Previamente se estableció el efecto del uso de los tres aditivos lubricantes en cada una de las formulaciones, permitiendo establecer de forma experimental la dosificación óptima de acuerdo a la naturaleza y característica del fluido de prueba. En procura de sustentar, desde una perspectiva conjunta dichas escogencias, se procede al desarrollo de un análisis de costos que permite visualizar la incidencia económica en que podría incurrirse a la hora de llevar a cabo proyectos de mayor envergadura. En principio la evaluación de costos se desarrolló para cada barril de fluido de perforación propuesto, estudiado y desarrollado durante el presente proyecto.

El análisis no contiene elementos tales como ingresos dentro del proceso teniendo en cuenta que los fluidos en sí mismos no generan ganancias monetarias durante el desarrollo del proyecto; lo anterior es sustentado bajo el parámetro de comparación de los diferentes aditivos lubricantes aunado a la eficiencia en los fluidos de perforación propuestos, así como la naturaleza experimental y de laboratorio del mismo.

4.1 DETERMINACIÓN DE COSTOS

Asociado a cada una de las formulaciones se tiene unos costos los cuales hacen referencia a las materias primas que conforman el fluido. Estos son importantes a la hora de evaluar cómo es el impacto en la elaboración del fluido de un adicional como lo son los aditivos lubricantes, que son objeto del presente proyecto. Dichos aditivos tienen un costo de manera particular y conocerlo permite evaluar cómo se altera el costo por barril del fluido conforme se aumenta la concentración del aditivo. A continuación se despliegan los costos totales determinados para la hechura de un barril de fluido de perforación de acuerdo a las formulaciones establecidas previamente...**Ver 3.1 y 3.2...**

4.1.1 Costos – Formulación 1. Para la formulación 1 se cuenta con los costos relacionados a los aditivos en la **Tabla 27**, a la cantidad requerida de fluido base y al agente densificante el cual como se expresó anteriormente varía en cada formulación.

Tabla 27. Costos de aditivos - Formulación 1

Producto	Gravedad específica	Concentración (lb/BBL)	Presentación	Costo (USD)	Costo (USD/lb)	Costo (USD/gal)	Costo por barril (USD/BBL)
Amortiguador de pH - Soda caústica	2,04	0,05	55 lb	31,33	0,57	-	0,03
Goma xantano	1,05	1	55 lb	187,97	3,42	-	3,42
Celulosa polianiónica	1	2,5	50 lb	140,98	2,82	-	7,05
Inhibidor de arcillas 1	1	5	55 gal	1253,13	-	22,78	13,68
Agente puenteante	2,7	25	110 lb	15,66	0,14	-	3,56
Inhibidor de arcillas 2	1,06	2	55 gal	935,85	-	17,02	3,85
Controlador de filtrado	1	5	50 lb	73,1	1,46	-	7,31
Glutaraldehído	1	0,5	50 lb	65,78	1,32	-	0,66
Lignosulfonato de cromo	1,3	3	25 lb	43,23	1,73	-	5,1876
						Total aditivos	44,74

Teniendo en cuenta que el fluido de perforación requirió una base en la cual mezclar los aditivos previamente enunciados, se establecen los costos asociados a la misma, siendo estos de 0,16 USD/BBL que para esta formulación corresponde a la cantidad de agua utilizada en un barril de fluido. De igual modo, el fluido de perforación de esta formulación se caracteriza por una alta densidad, la cual fue alcanzada a partir del uso de barita, densificante que aportó un 52% al valor total del fluido, siendo este equivalente a 48,05 USD/BBL y dejando así un valor total para la formulación 1 de **92,95 USD/BBL**.

4.1.2 Costos – Formulación 2. Con las correspondientes variaciones de la formulación 1, se encuentra como varían los costos asociados a la elaboración de un barril de esta formulación, la cual se caracteriza por tener una densidad más baja y usar como único agente densificante el carbonato de calcio.

En la **Tabla 28**, se observa los costos concernientes a los aditivos utilizados en la preparación de un barril de fluido los cuales corresponden a 35,53 USD/BBL; de manera alterna se denota que la formulación 2, requirió 310,24 lb/BBL de agua para su hechura, siendo las mismas equivalentes a 0,18 USD/BBL. Así mismo el empleo de carbonato de calcio como material densificante dio lugar a un aporte de 12,69 USD/BBL permitiendo así obtener un valor total de la formulación 2 de **48,41 USD/BBL**.

Es de destacar la contribución económica proveniente de los inhibidores de arcilla quienes en conjunto corresponden a un 35% del valor total del fluido, destacándose así la relevancia del control y prevención de formaciones reactivas comúnmente encontradas en las diversas operaciones de perforación.

Tabla 28. Costos de aditivos - Formulación 2

Producto	Gravedad específica	Concentración (lb/bbl)	Presentación	Costo (USD)	Costo (USD/lb)	Costo (USD/gal)	Costo por barril (USD/BBL)
Amortiguador de pH - Soda cáustica	2,04	0,05	55 lb	31,33	0,57	-	0,03
Viscosificante - Goma xantano	1,05	0,8	55 lb	187,97	3,42	-	2,73
Celulosa polianiónica	1	2,5	50 lb	140,98	2,82	-	7,05
Inhibidor de arcillas	1	2	55 gal	1253,13	-	22,78	5,47
Inhibidor de arcillas 2	1,06	6	55 gal	935,85	-	17,02	11,56
Agente puenteante	2,7	20	110 lb	15,66	0,14	-	2,85
Controlador de filtrado	1	4	50 lb	73,1	1,46	-	5,85
						Total aditivos	35,54

Al realizar una comparación con los costos descritos para la formulación 1, se observa cómo a medida que disminuye el uso de agentes densificantes, el costo de elaborar un barril de fluido se ve reducido notablemente; además de los costos pertenecientes a aditivos de mayor eficiencia, si bien las formulaciones difieran una de la otra, la comparación permite dar una idea de que barril es afectado más seriamente por el uso de un aditivo lubricante, puesto que no constituye el mismo incremento para un fluido de un costo bajo o medio, que para uno de un precio mucho mayor.

4.1.3 Costos – Formulación 3. Al ser la formulación más sencilla, el costo relacionado con los aditivos utilizados para la elaboración es muy reducido, más sin embargo la mayor fracción se debe a la goma xantano.

La formulación número tres (3) en los fluidos base agua resulta ser una de las más económicas teniendo en cuenta que para su desarrollo no es requerido material densificante, debido a su baja densidad basta con un aditivo tal como la goma xantano para alcanzar el valor determinado; por supuesto, el aditivo provee el mayor densidad sobre el precio del fluido con un costo de aditivos de 6,87 USD/BBL representando un 96,6% del valor de la mixtura, así mismo fueron requeridas 348 lb de agua para permitir la formación del fluido, siendo estas equivalentes a 0,21 USD/BBL y dando así lugar a un costo total del fluido de **7,08 USD/BBL**. Los costos asociados a los aditivos para esta formulación son consignados en la **Tabla 29**.

Tabla 29. Costos - Formulación 3

Producto	Gravedad específica	Concentración (lb/bbl)	Presentación	Costo (USD)	Costo (USD/lb)	Costo (USD/gal)	Costo por barril (USD/BBL)
Amortiguador de pH - Soda cáustica	2,04	0,05	55 lb	31,33	0,57	-	0,03
Goma xantano	1,05	2	55 lb	187,97	3,42	-	6,84
						Total aditivos	6,87

4.1.4 Costos – Formulaciones base aceite. Los fluidos base aceite fueron desarrollados empleando el mismo conjunto de aditivos en las tres formulaciones, así como la misma base siendo esta 214 lb de diésel adicionando a cada una de las formulaciones 75,11 USD/BBL en su costo; para las concentraciones de los aditivos utilizados se presenta la **Tabla 30**.

Ahora bien los fluidos son diferenciados entre sí por el contenido y/o material densificante empleado como se observa a continuación

- **Formulación 4:** Se emplearon 360 lb de carbonato de calcio y 275 lb de barita en procura de llevar el fluido hasta la densidad deseada de 13 libras por galón, implicando así un aporte de 107,4 USD/BBL, obteniendo así un total de **287,65 USD/BBL**.
- **Formulación 5:** Fueron dosificadas 157,36 lb de carbonato de calcio las cuales contribuyeron en 22,40 USD/BBL, dando lugar a un precio total de fluido de **202,65 USD/BBL**.
- **Formulación 6:** Se dio lugar a la adición de 20 lb de material densificante el cual agregó un valor de 2,85 USD/BBL permitiendo así obtener un valor total de fluido de **183,1 USD/BBL**.

Tabla 30. Costos aditivos para las formulaciones base aceite

Producto	Concentración (lb/bbl)	Presentación	Costo (USD)	Costo (USD/lb)	Costo por galón (USD/gal)	Costo por barril (USD/BBL)
Arcilla organofílica	11	55 lb	125,31	2,28		25,06
Cal hidratado	7	55 lb	21,93	0,40	-	2,79
Emulsificante	7	55 gal	939,85		17,09	15,28
Modificador reología de alta	2	55 gal	1800	-	32,73	8,93
Humectante de roca	3	55 gal	939,85	-	17,09	5,81
Controlador de filtrado soluble en aceite	4	55 lb	650	11,82	-	47,27
					Total aditivos	105,14

Debe destacarse el aporte del controlador de filtrado soluble en aceite teniendo en cuenta que el mismo oscila entre el 16% y 26% del precio total de cada uno de los fluidos, siendo este aditivo de suma importancia pues es el encargado de disminuir el daño a la formación así como de prevenir el efecto sobre el medio ambiente, aspecto culmen a tener en cuenta a la hora de trabajar con fluidos en base aceite.

Con motivo de realizar una comparación más apreciable entre los costos de cada ámbito de las formulaciones y el costo total de las mismas se presenta condensado en la **Tabla 31** lo descrito anteriormente.

Tabla 31. Costos totales de cada formulación

Formulación (Base)	Costo aditivos (USD/BBL)	Costo fluido base (USD/BBL)	Costo agente densificante (USD/BBL)	Costo total (USD/BBL)
1 (Agua)	44,74	0,16	48,05	92,95
2 (Agua)	35,53	0,18	12,69	48,41
3 (Agua)	6,87	0,21	-----	7,08
4 (Aceite)	105,14	75,15	107,4	287,65
5 (Aceite)	105,14	75,15	22,4	202,65
6 (Aceite)	105,14	75,15	2,85	183,1

4.1.5 Costos – Aditivos lubricantes. De igual manera los costos ligados a cada uno de los aditivos lubricantes son discriminados, de la forma mostrada en la **Tabla 32.**

Tabla 32. Costos - Aditivos lubricantes

Producto	Presentación	Costo (USD/lb)
Glicol	55 gal	2,31
Poliacrilamida	55 gal	1,20
Esferas de vidrio	55 gal	0,95

4.2 ANÁLISIS DE COSTOS

Luego de tener los precios específicos para cada fluido...**Ver 4.1**... se procede a establecer comparaciones entre los fluidos de perforación así como los aditivos lubricantes permitiendo obtener un grado más amplio de contraste general ante características y costos de los diferentes elementos involucrados.

En primera instancia es posible evidenciar la diferencia de costos de los fluidos de acuerdo a la base empleada, en donde se denota de sobremanera, que los costos de los fluidos base aceite son más altos que aquellos obtenidos en los fluidos base agua; se atribuye principalmente a los costos individuales de los aditivos, los cuales deben promover en primera instancia el cuidado ambiental y aspectos específicos que propendan por la manutención de las emulsiones u otras características propias de los fluidos base aceite.

De igual de manera se hace énfasis en el peso económico debido a los agentes densificantes, siendo estos quienes aportan entre el 2% y 52% de los costos totales de los fluidos base dando lugar a las mayores repercusiones económicas generales y en los cuales debe tenerse precaución en procura de dar lugar a la mayor utilidad con el menor gasto de los mismos, puesto que independiente de cuan bajo pueda ser su costo, la cantidad de material pertinente para alcanzar las densidades requeridas complementa dicho aspecto y hace de los aditivos densificantes uno de los cuales aporta en mayor medida al conjunto de costos asociados a los fluidos.

Ahora bien, teniendo en cuenta que el costo de los fluidos propuestos es directamente afectado por la concentración de cada uno de los aditivos dosificados, se procede a visualizar el aporte económico que los mismos generan; para ello se debe aplicar la **Ecuación 21** en procura de obtener la dosificación correspondiente de cada aditivo lubricante en un barril de fluido así:

Ecuación 21. Dosificación de aditivo cada 0,5%

$$DOSIFICACIÓN = G.E_{LUBRICANTE} * \% \text{ de dosificación} * densidad_{agua}$$

Bajo dicho parámetro se establecen las dosificaciones iniciales respectivas y se obtiene

$$D_{glicol} = 0,95 * 0,5\% * 350 \text{ lb/BBL} = 1,66 \text{ lb/BBL}$$

$$D_{poliacrilamida} = 0,90 * 0,5\% * 350 \text{ lb/BBL} = 1,58 \text{ lb/BBL}$$

$$D_{bolas \text{ de vidrio}} = 0,98 * 1\% * 350 \text{ lb/BBL} = 3,43 \text{ lb/BBL}$$

Teniendo en cuenta que para el desarrollo del proyecto fueron propuestas dosificaciones del 0% v/v al 3% v/v para los aditivos glicol y poliacrilamida en fluidos base agua con aumentos progresivos y constantes de 0,5% v/v, basta con sumar las cantidades hasta alcanzar la dosificación deseada, las esferas de vidrio tendrán la salvedad de incluir un mayor porcentaje para su dosificación debido que

su accionar no es químico sino mecánico conllevando en primera instancia al requerimiento de mayor material en procura de compensar y alcanzar resultados comparables a aquellos aditivos cuyo principio de trabajo es químico y depende de su interacción con el conjunto de elementos de la mezcla.

Con cada dosificación se agrega una cantidad correspondiente al 0,5% para la poliacrilamida y el glicol, y del 1% para las esferas de vidrio, con esto se obtiene una adición de costo al barril de fluido. Tal adición consta de multiplicar la dosificación por el costo por libra del aditivo. Para tal fin se obtiene un costo por dosificación de cada aditivo descrito a continuación en la **Tabla 33**.

Tabla 33. Costo por dosificación

Aditivo lubricante	Costo por dosificación
Glicol	3,84 USD/0,5%
Poliacrilamida	1,90 USD/0,5%
Esferas de Vidrio	3,26 USD/1,0%

Con cada dosificación realizada se obtienen el siguiente incremento en dólares relacionado en la **Tabla 34**, para un barril de fluido, conforme aumenta la concentración del aditivo, de manera directamente proporcional aumenta el costo adicionado al barril

Tabla 34. Costo adicionado con glicol y poliacrilamida

Concentración (%V/V)	Costo adicionado con glicol (USD)	Costo adicionado con poliacrilamida (USD)
0,0	0,00	0,00
0,5	3,84	1,90
1,0	7,68	3,80
1,5	11,52	5,70
2,0	15,36	7,60
2,5	19,20	9,50
3,0	23,04	11,40

Se obtiene un costo mayor en la utilización de glicol que en la poliacrilamida, dado que estos dos comparten las concentraciones evaluadas se puede establecer una comparación directa entre ellos, en cada uno de los puntos evaluados. En cuanto

a la utilización de las esferas de vidrio el costo fue más grande debido a la mayor cantidad de aditivo que debe ser utilizado durante la dosificación, lo anterior puede ser observado en la **Tabla 35**.

Tabla 35. Costo adicionado por las esferas

Concentración (%V/V)	Costo adicionado por las esferas (USD)
0,0	0,00
1,0	3,43
2,0	6,86
3,0	10,29
4,0	13,72

El comportamiento es el mismo que el evidenciado, en la dosificación de los otros dos aditivos lubricantes, de manera directamente proporcional, con lo cual se puede asegurar que sin importar el aditivo elegido de los tres expuestos en el presente proyecto esta tendencia ascendente permite la determinación de una dosificación en la cual se logre la mayor disminución del coeficiente de fricción con el menor costo adicionado al fluido.

4.3 EVALUACIÓN EFICIENCIA – COSTOS.

Previamente definidas las repercusiones tenidas por el uso de cada uno de los aditivos lubricantes se dio lugar a la escogencia específica para cada una de las formulaciones, aunado a los costos de los fluidos y la eficiencia por la dosificación de los mismos se permite la comparación de los parámetros y de ese modo establecer las condiciones óptimas que refieran al menor costo y la mayor eficiencia que se adecue para cada fluido propuesto como se muestra a continuación.

4.3.1 Concentración adecuada – Formulación 1. Siendo la formulación 1 el fluido base agua más pesado con una densidad aproximada de 13 ppg, y de acuerdo con lo determinado en la matriz de contraste...**Ver Capítulo 3**...se estableció a la poliacrilamida como el mejor aditivo siendo este el que afectaba las propiedades fisicoquímicas en menor medida así como potencializaba la lubricidad del fluido siendo está la propiedad crítica de evaluación.

En procura de hacer evidente una concentración del aditivo que de acuerdo a la experimentación hiciera del mismo más efectivo se procede al desarrollo de una gráfica en que son comparados el cambio de la propiedad original contra el aporte monetario máximo desarrollado sobre el fluido obteniendo así el máximo aporte al

menor costo, es decir un punto operacional que brindara un punto de partida para posteriores estudios. A continuación en la **Ecuación 22** se despliega una muestra de cálculo general que pone en evidencia cada aspecto a ser representado en la respectiva gráfica.

Ecuación 22. Porcentaje de la propiedad inicial

$$\%Propiedad\ inicial = \frac{Propiedad\ experimental}{Propiedad\ base} * 100$$

$$\%Propiedad\ inicial\ (0\% V/V) = \frac{0,227}{0,227} * 100 = 100\%$$

$$\%Propiedad\ inicial\ (0,5\% V/V) = \frac{0,217}{0,227} * 100 = 96\%$$

Como se evidenció en el cambio del coeficiente de fricción en capítulos anteriores, este tiende a disminuir debido al efecto lubricante de los aditivos, por lo tanto representa una disminución respecto al valor inicial generando una tendencia decreciente en la gráfica y los valores de la misma.

Haciendo referencia al porcentaje máximo de aporte generado por la concentración de cada aditivo se dio una correlación entre el aumento porcentual del precio del aditivo y la concentración del mismo expresada por la **Ecuación 23**.

Ecuación 23. Porcentaje máximo de aporte al fluido de perforación

$$\% aporte\ máximo = \frac{Concentración * Valor\ aditivo\ (min\ concentración)}{Concentración\ aditivo\ (min\ concentración) * Máximo\ aporte} * 100$$

$$\% aporte\ máximo = \frac{0\% * 1,9 \frac{USD}{0,5\%}}{0,5\% * (1,9 \frac{USD}{0,5\%} * 6)} * 100 = 0\%$$

$$\% aporte\ máximo = \frac{0,5\% * 1,9}{0,5\% * 11,4} * 100 = 17\%$$

Como fue determinado previamente los aditivos representan un costo adicional para los fluidos de perforación, de manera que cada concentración que se

determine tendrá asociada un incremento porcentual en el valor del fluido, dando lugar a una curva de tendencia creciente en donde debe considerarse la máxima concentración igual al máximo aporte, aun cuando pudiera dosificarse aditivo de manera infinita habrá de considerarse el 3% como dicho culmen puesto que se hace evidente como se requiere más aditivo para generar cambios más pequeños en la propiedad representando mayores costos y posibles inversiones inoficiosas.

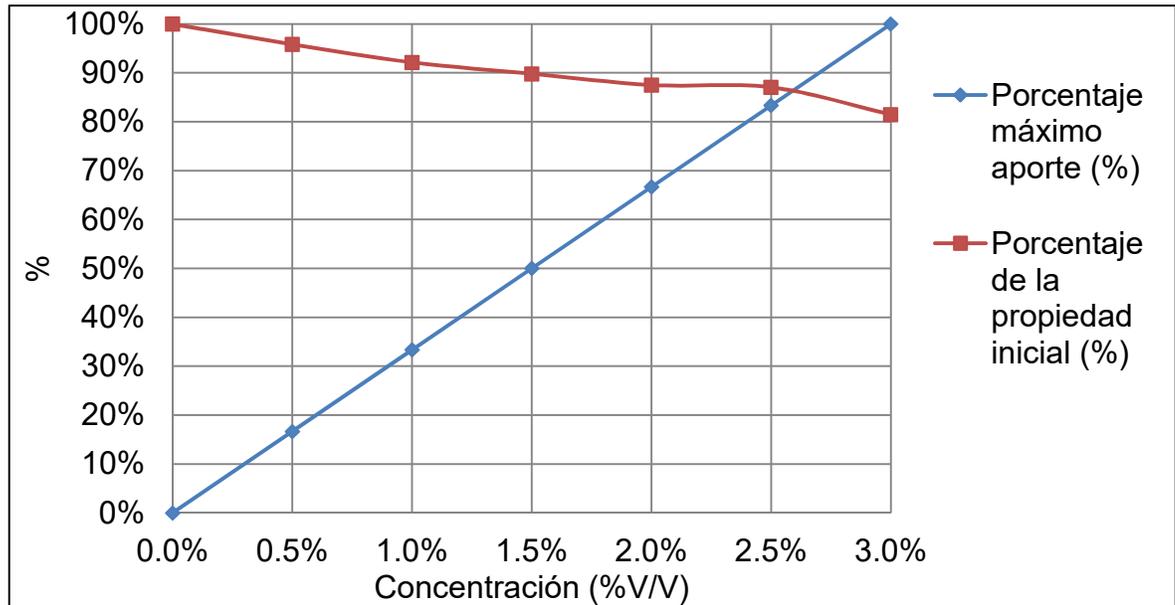
Dado lo anterior se presenta a continuación la **Tabla 36** que recoge los valores previamente enunciados y calculados en su totalidad.

Tabla 36. Relación costo-eficiencia Formulación 1

Concentración (%V/V)	Porcentaje de la propiedad inicial	Porcentaje del máximo
0,0	100%	0%
0,5	96%	17%
1,0	92%	33%
1,5	90%	50%
2,0	88%	67%
2,5	87%	83%
3,0	81%	100%

Las funciones correspondientes a las dos curvas mostradas en la **Gráfica 5** corresponden a dos polinomios de grado seis y uno para la dependencia del cambio de la propiedad y el porcentaje máximo de aporte ambos en función a la concentración, respectivamente, dichos polinomios se presentan posteriormente en las **Ecuaciones 24 y 25**.

Gráfica 5. Determinación de concentración adecuada - Formulación 1



Ecuación 24. Función del porcentaje de la propiedad inicial respecto a la concentración - Formulación 1

$$y = -15111111271x^6 + 1320000014x^5 - 441111112x^4 + 695000x^3 - 4888x^2 + 3.80x + 1$$

Ecuación 25. Función del máximo aporte respecto a la concentración - Formulación 1

$$y = (100/3)x$$

Donde:

x: Concentración de aditivo lubricantes en %V/V

y: Porcentaje máximo de aporte (%) – Porcentaje de la propiedad inicial (%)

Finalmente se obtiene un punto operacional experimental a una concentración del 2,60% de aditivo (poliacrilamida), una disminución del 13,25% respecto al valor de la propiedad inicial y un 86,75% en lo referido al aporte económico del aditivo, lo anterior mediante la determinación del valor de la concentración o variable independiente x, en el cual se satisface que ambas ecuaciones obtengan valores iguales, para tal determinación se utilizó la herramienta *Solver* del software Excel® de la suite de Microsoft Office 2010.

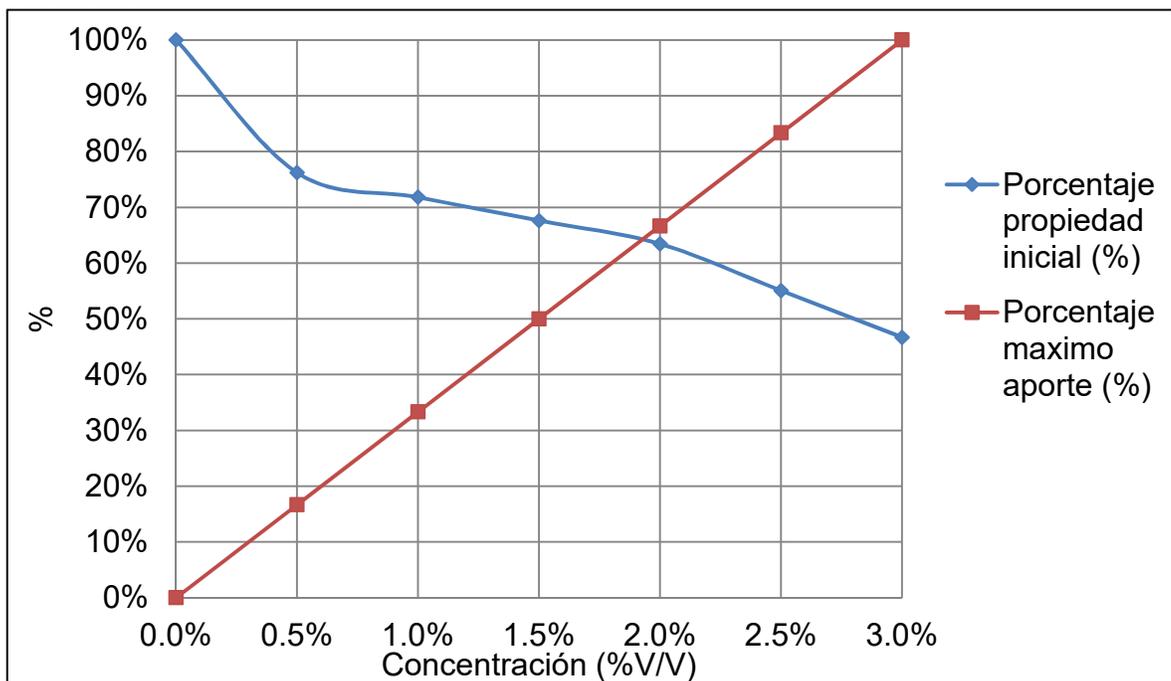
4.3.2 Concentración adecuada – Formulación 2. Bajo el mismo principio aplicado en el numeral anterior...ver 4.3.2... se procede al desarrollo de la determinación de la máxima eficiencia al menor costo para la poliacrilamida en el fluido de perforación con densidad de 10 ppg, con los porcentajes suministrados por la **Tabla 37**

Tabla 37. Relación costo-eficiencia Formulación 2

Concentración (%V/V)	Porcentaje propiedad inicial (%)	Porcentaje máximo aporte (%)
0,0	100%	0%
0,5	76%	17%
1,0	72%	33%
1,5	68%	50%
2,0	63%	67%
2,5	55%	83%
3,0	47%	100%

Las funciones correspondientes a las dos curvas mostradas en la **Gráfica 6** conciernen a dos polinomios de grado seis y uno para la dependencia del cambio de la propiedad y el porcentaje máximo de aporte ambos en función a la concentración, respectivamente, dichos polinomios se presentan de manera posterior en las **Ecuaciones 26 y 27**.

Gráfica 6. Determinación de concentración adecuada - Formulación 2



Ecuación 26. Función del porcentaje de la propiedad inicial respecto a la concentración - Formulación 2

$$y=23111111409x^6-2266666694x^5+ 88444445x^4 -1763333x^3 +18774x^2-107x+1$$

Ecuación 27. Función del máximo aporte respecto a la concentración - Formulación 2

$$y=(100/3)x$$

El fluido de 10 ppg representó mejores resultados dado que en primer lugar permitió un mayor cambio de la propiedad inicial siendo este del 36,06% a una concentración del 1,92% de poliacrilamida y un aporte económico porcentual del 63,94% haciendo al fluido una mejor alternativa al ser comparado con su contraparte de 13 ppg, dicha resultados fueron hallados mediante la determinación del valor de la concentración o variable independiente x, en el cual se satisface que ambas ecuaciones obtengan valores iguales, para tal determinación se utilizó la herramienta *Solver* del software Excel® de la suite de Microsoft Office 2010.

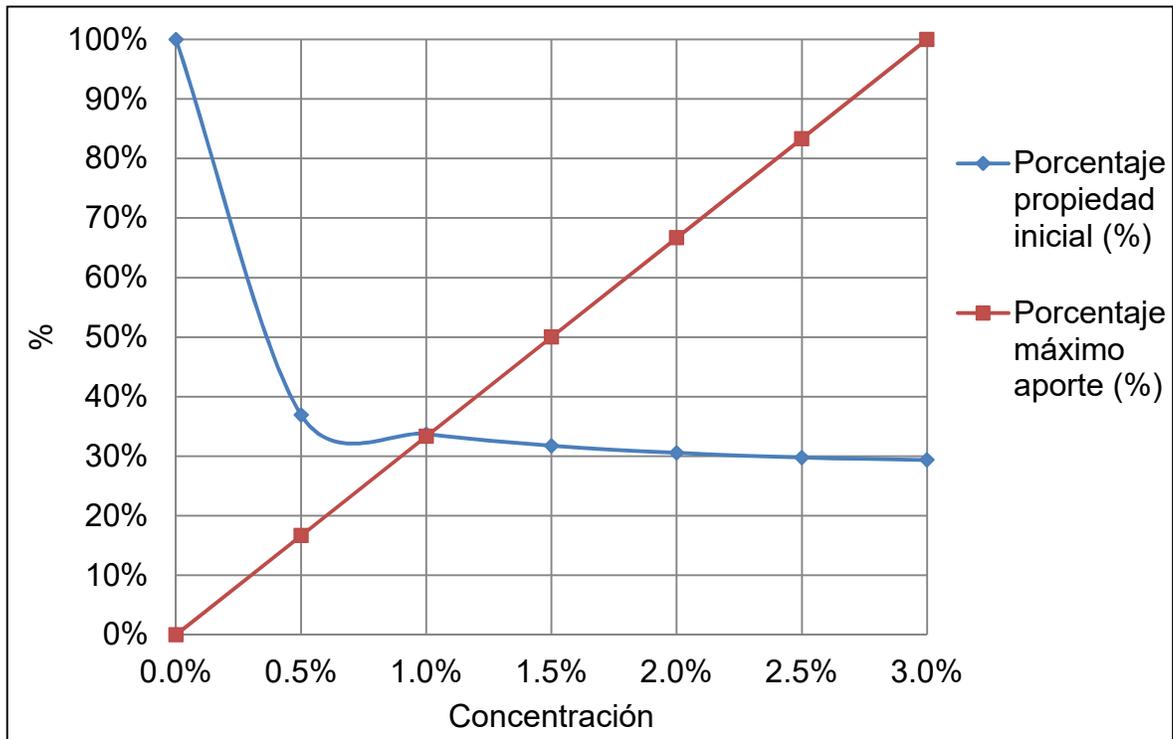
4.3.3 Concentración adecuada – Formulación 3. Debido a la naturaleza del fluido menos denso y más limpio, el cual carece de material densificante, así como sólidos o material de otra naturaleza que pudiera afectar la reología y lubricidad del fluido, se determina de antemano como el mejor prospecto para la dosificación, todo lo anterior soportado por los porcentajes descritos en la **Tabla 38**.

Tabla 38. Relación costo-eficiencia Formulación 3

Concentración (%V/V)	Porcentaje propiedad inicial (%)	Porcentaje máximo aporte (%)
0,0	100%	0%
0,5	37%	17%
1,0	34%	33%
1,5	32%	50%
2,0	31%	67%
2,5	30%	83%
3,0	29%	100%

Las funciones correspondientes a las dos curvas mostradas en la **Gráfica 7** pertenecen a dos polinomios de grado seis y uno para la dependencia del cambio de la propiedad y el porcentaje máximo de aporte ambos en función a la concentración, respectivamente, dichos polinomios se presentan a posteriori en las **Ecuaciones 28 y 29**.

Gráfica 7. Determinación de concentración adecuada - Formulación 3



Ecuación 28. Función del porcentaje de la propiedad inicial respecto a la concentración - Formulación 3

$$y=55111111890x^6-5733333404x^5+236444447x^4-4916667x^3+54054x^2-299.5x+1$$

Ecuación 29. Función del máximo aporte respecto a la concentración - Formulación 3

$$y=(100/3)x$$

De acuerdo a la matriz de contraste el aditivo lubricante que mejor desempeño tuvo en el fluido menos denso fue el glicol, el cual a partir de una concentración del 1,02% alcanzaría una reducción en el coeficiente de fricción del 66,03% a partir de un aporte económico porcentual del 33,97%, el hallazgo de la concentración más eficiente, fue realizada mediante la determinación del valor de la concentración o variable independiente x , en el cual se satisface que ambas ecuaciones obtengan valores iguales, para tal determinación se utilizó la herramienta *Solver* del software Excel® de la suite de Microsoft Office 2010.

Debe tenerse en cuenta que de manera teórico-experimental se da la escogencia general de la poliacrilamida como el aditivo idóneo para los fluidos base agua, siendo aquel con más representatividad en lo referido a la menor variación de las propiedades fisicoquímicas y mayor eficiencia respecto a la lubricidad (propiedad crítica de evaluación), aun cuando su desempeño no alcanzó un máximo en los fluidos de baja densidad tuvo un desempeño comparable haciéndole el mejor prospecto a ser aplicado durante futuras aplicaciones del proyecto a gran escala.

4.3.4 Concentración adecuada – Formulaciones base aceite. Como se expresó a lo largo del presente proyecto y mediante la experimentación se comprobó, para fluidos base aceite la adición de aditivos lubricantes, no es eficiente puesto que no altera de manera positiva las propiedades del fluido, sino que compromete las mismas de manera negativa y se convierten en un residuo para el fluido, conforme que no presentan compatibilidad con el mismo, o las características de los mismo no ejercen ningún efecto, para cuestiones de este proyecto en el coeficiente de fricción que posee el fluido base aceite; por lo tanto determinar una concentración adecuada para las formulaciones 4, 5 y 6 es innecesario y la más adecuada es la ausencia por completo del uso de agentes lubricantes.

Luego de realizada la correspondiente evaluación para cada formulación, encontrando el aditivo más adecuado y la concentración que presenta la mayor reducción del coeficiente de fricción, con un menor costo asociado, se puede establecer el aporte por barril que tendría la concentración hallada para cada formulación. Dicha información se consigna en la **Tabla 39**

Tabla 39. Incremento en el costo de cada formulación por barril

Formulación	Aditivo seleccionado	Concentración optima (%V/V)	Incremento (USD/BBL)
1	Poliacrilamida	2,60	9,88
2	Poliacrilamida	1,92	7,33
3	Glicol	1,02	7,68
4	No aplica	-----	0,00
5	No aplica	-----	0,00
6	No aplica	-----	0,00

Es necesario mencionar como la mejor opción para las formulaciones base aceite, fue el no agregar ningún aditivo lubricante, conservando con ello un incremento nulo en el costo por barril de la formulación respectiva.

5. CONCLUSIONES

- El empleo de glicol y poliacrilamida como aditivo lubricante en las formulaciones base agua repercute sobre el filtrado API, dando lugar a un decremento del mismo, consecuencia del aumento en la viscosidad plástica y con ello la reducción de la capacidad de la mezcla para atravesar el medio filtrante.
- Los fluidos de perforación base aceite no requieren de un aditivo lubricante debido a la naturaleza del mismo, y de los aditivos disponibles en el mercado, para el caso de las esferas de vidrio se corrobora lo mencionado, pues se presenta un aumento de hasta el 8% en el coeficiente de fricción conforme se realiza la dosificación del aditivo.
- El uso de los tres tipos de aditivos lubricantes genera un incremento en la viscosidad plástica, el cual es compensado con el aumento progresivo del punto cedente.
- El glicol es el aditivo lubricante más eficiente para los fluidos de baja densidad en una concentración de 1% v/v, en contraparte los fluidos de perforación de densidad media y alta densidad coinciden en la poliacrilamida como el aditivo de mayor eficiencia en concentraciones de 1,93% v/v y 2,6% v/v respectivamente.
- La poliacrilamida y las esferas de vidrio empleadas como agentes lubricantes, no presentan el fenómeno de saponificación con las formulaciones base agua, confirmando así la incapacidad de los mismos de generar espuma.
- El empleo de aditivos lubricantes genera alteraciones en las propiedades fisicoquímicas de las formulaciones de prueba base agua, estos cambios se encuentran ligados directamente a la concentración de cada sustancia y la naturaleza del fluido de perforación, así como la interacción del mismo con cada aditivo.
- El empleo de glicol como agente lubricante de fluidos base agua conlleva a la disminución de su densidad, aproximadamente un 2,36% equivalente a 0,3 libras por galón, debido a la capacidad de formación de espumas en ambientes básicos y con suficiente agitación.
- El uso de lubricantes mecánicos resulta ineficiente en comparación al efecto obtenido por aditivos que presenten una naturaleza de acción química, dado que se requiere de una cantidad mayor del mismo para compensar el efecto lubricante que presenten los otros aditivos.

- El uso de la poliacrilamida en fluidos de perforación base agua de media y alta densidad en las concentraciones ya indicadas, trae un incremento de 7,33 USD/bbl y 9,88 USD/bbl respectivamente.
- El uso de glicol en un fluido de baja densidad tiene un incremento de 7,68 USD/bbl en la concentración más eficiente ya descrita, lo anterior considerando un fluido base agua.

6. RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo un estudio de factibilidad para la implementación de los aditivos lubricantes (poliacrilamida, glicol y esferas de vidrio) a nivel de campo.
- Determinar el efecto de las esferas de cerámica en fluidos base agua y base aceite y sus efectos contra aquellos establecidos en el presente proyecto.
- Desarrollar una metodología de selección de aditivos lubricantes con base en una mayor cantidad de escenarios de evaluación (formulaciones de fluidos de perforación).
- Desarrollar un estudio del efecto ambiental en el que se incurre con la implementación de cada uno de los aditivos lubricantes presentados, a nivel de campo.
- Desarrollar un estudio a nivel de laboratorio del efecto del uso de los aditivos lubricantes del presente proyecto en su forma pura.
- Evaluar el uso de antiespumantes en fluidos de perforación base agua donde sea usado el glicol como aditivo lubricante.

BIBLIOGRAFÍA

3M. Use of 3M Glass bubbles in drilling fluids – General guidelines. USA. 2012

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13A. 5th ed. Washington, USA: 2013.

_____. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p.10.

_____. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p. 17.

_____. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13B-2. 5th ed. Washington, USA: 2013. p. 38.

_____. Recommended Practice on Standard Procedure for Testing Drilling Fluids. API RP 13A. 5th ed. Washington, USA: 2013.

BAROID. Manual de Fluidos. Houston, USA: 2000. p. 417.

_____. Manual de Fluidos. Houston, USA: 2000. p. 418.

_____. Manual De Fluidos. Houston, USA:s.n. ,1977. Cap. 4. p. 16-4

CABRERA, Francisca. Lección 14. Alquenos III [diapositivas]. Universidad de Sevilla, 2007. 14 diapositivas, color.

CARRAHER, Charles. Seymour-/Carragher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.89.

_____. Seymour-/Carraher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.137.

_____. Seymour-/Carraher's polymer chemistry. Florida, USA: 2007. p.138.

EBSCO Industries, Inc. EbscoHost [Base de datos en línea]. 2015. [consultado 08 de octubre de 2015]. Disponible en < <http://goo.gl/8jrOAV> >

ELSEVIER B.V. Scopus. [Base de datos en línea]. 2015. [citado en 08 de octubre de 2015]. Disponible en < <http://goo.gl/apTtL9> >

FARMACIA Y BIOQUÍMICA. Éteres y epóxidos. [En línea]. Disponible en internet: <<http://goo.gl/AA5oxT>> [Citado en 02 de febrero de 2016].

FERNÁNDEZ, German. Hidrólisis básica de ésteres. Saponificación [En línea]. Disponible en <<http://goo.gl/rbq3yU>> [Citado en 26 de febrero de 2016]

FORNASIER, Frank et al. Selecting appropriate lubricants for the reservoir section: A customized solution for Peregrino Field – Offshore Brazil. En: Offshore Technology Conference Brazil. (29 – 31 Octubre 2013: Rio de Janeiro, Brasil).

GRAHAM, T.W. Fundamentos de química orgánica. México. 1999. p. 254

HERMIDA, Élida. Polímeros. En: Colección Encuentro Inet. Argentina: 2011.p. 17.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DRILLING CONTRACTORS. Drilling Manual. Houston:USA:s.n. , 2000. p. O9-O10.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. 110 p.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 2008. 45 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El instituto, 1998. 33 p.

MALDONADO BAUTISTA, Ángela María. Formulación y evaluación de fluidos de perforación de base agua de alto rendimiento aplicado al campo balcón como sustitutos de lodo base aceite. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2006. p.28-34.

MCCORMICK, John, y CHIU, TzuFang. The practice and evolution of torque and drag reduction: Theory and field results. En: SPE Annual Technical Conference and Exhibition held. (30 Octubre – 2 Noviembre 2011: Denver, USA).

OFITE. EP (Extreme Pressure) and Lubricity Tester Instruction Manual. Ver 3. Houston, USA: 2016. p.11-14.

OXITENO, Boletín técnico Glycol. Brasil:s.n. 2015.

PATEL, Arvind, et al. Lubricants and drag reducers for oilfield applications – Chemistry, performance and environment impact. En: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. (8 – 10 Abril 2013: The Woodlands, Texas, USA).

PerfoBlogger. Lavado de la tubería y/o hoyo (Wash out). 2015. [en línea]. Disponible en: <<http://perfob.blogspot.com.co/2015/10/lavado-de-la-tuberia-yo-hoyo-wash-out.html>> [citado en 27 de enero de 2016].

ROMAI, Yrán. Manual De Fluidos De Perforación. México:s.n. ,2008. p. 133.

SCHLUMBERGER LIMITED. Oilfield Glossary. Bentonita. [en línea], Colombia, [Citado en 27 de enero de 2016]. Disponible en:<<http://goo.gl/WFyHT3>>.

_____. Goma Xantano. [en línea], Colombia, [Citado en 27 de enero de 2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/LqRfbO>>.

_____. Polímero. [en línea], Colombia, [Citado en 27 de enero de 2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/K96X5m>>.

_____. Atapulguita. [en línea], Colombia, [Citado en 27 de enero de 2016]. Disponible en: <<http://goo.gl/69xZBm>>.

SPE. OnePetro [Base de datos en línea]. 2015. [Citado en 08 de octubre de 2015]. Disponible en < <https://goo.gl/x222mQ> >.

THORTNTON MORRISON, Robert. Química orgánica. Quinta edición. Nueva York: New York University, Prentice Hall, 1996. p. 298-300, 331-332, 633, 705-706.

TRANSMERQUIM DE COLOMBIA, S.A. Certificado de análisis, esferas cerámicas >35MPa. Bogotá D.C., Colombia, p. 2

UNIVERSIDAD DE GRANADA. 4- Interacciones por enlaces o puentes de hidrógeno. En: Estructura de Macromoléculas. España. p. 37

Universidad de Zaragoza. Química orgánica para ingenieros, tema 13. Alquenos II [diapositivas]. Universidad de Sevilla, 2007. 106 diapositivas, color.

WILLIAMSON Don. Fundamentos de los fluidos de perforación. En: Oilfield Review. Vol.1, No. 25 (Marzo – Junio, 2013)