

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA**



**PROYECTO DE GRADO**

**ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE UN FLUIDO DE  
PERFORACIÓN BASE AGUA A PARTIR DE LA SEMILLA DE  
CHÍA (Salvia Hispánica) COMO INHIBIDOR DE ARCILLAS PARA  
POZOS EN EL ÁREA DEL BOOMERANG HILLS**

**POSTULANTE: SILVANA WENDY RIOS FLORES**

**TUTOR: M.Sc. ING. PEDRO REYNALDO MARÍN DOMÍNGUEZ**

**La Paz – Bolivia**

**2024**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Primitivo Ríos Salinas y Mónica Flores Aguilar, por guiarme, apoyarme, amarme y confiar en mí siempre.

A mis abuelos Silverio Flores (Q.E.P.D.) y Julia Aguilar, por ser mis segundos padres con su apoyo y amor incondicional.

A mis docentes de la carrera de Ingeniería Petrolera de la UMSA por el aprendizaje obtenido.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a las siguientes personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo:

A Dios y a la vida por haberme dado la dicha de ser una mujer completa, plena y capaz.

A mis padres Primitivo Ríos Salinas y Mónica Flores Aguilar, por su motivación, dedicación y apoyo constante durante toda mi etapa de estudio.

A mis abuelos Silverio Flores y Julia Aguilar que siempre me brindaron su apoyo, amor y consejos.

A la UMSA, por haberme permitido desarrollar mis estudios, a mis docentes, por su enseñanza y sabiduría, en especial al Ing. Pedro Reynaldo Marín Domínguez tutor de este proyecto y al Ing. Rodolfo Mauricio Álvarez Velasco por haberme guiado con su profesionalismo en laboratorio.

A todos aquellos amigos que formé en la carrera, por su trabajo en equipo y por compartir sus conocimientos con mi persona.

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
RESUMEN EJECUTIVO .....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	
1.1. Introducción .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Planteamiento del problema.....	1
1.3.1. Identificación del problema .....	1
1.3.2. Formulación del problema .....	2
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general .....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación .....	3
1.5.1. Justificación social .....	3
1.5.2. Justificación económica.....	3
1.5.3. Justificación técnica.....	4
1.5.4. Justificación ambiental .....	4
1.6. Viabilidad.....	4
1.7. Alcance .....	5
1.7.1. Alcance temático .....	5
1.7.2. Alcance geográfico o espacial.....	5
1.7.3. Alcance temporal.....	5

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1.	Definición de fluido de perforación.....	6
2.1.1.	Especificaciones.....	6
2.2.	Funciones del fluido de perforación.....	6
2.2.1.	Capacidad de transporte .....	7
2.2.2.	Enfriar y lubricar .....	7
2.2.3.	Formar revoque.....	8
2.2.4.	Controlar la presión de la formación.....	8
2.2.5.	Capacidad de suspensión .....	8
2.2.6.	Flotabilidad .....	8
2.2.7.	Estabilidad .....	8
2.2.8.	Evaluación.....	9
2.2.9.	Hidráulica.....	9
2.3.	Propiedades de los fluidos de perforación.....	9
2.3.1.	Densidad o peso. ....	9
2.3.2.	Reología.....	9
2.3.2.1.	Fluidos newtonianos .....	11
2.3.2.2.	Fluidos no newtonianos .....	11
2.3.3.	Viscosidad plástica.....	12
2.3.4.	Punto cedente .....	13
2.3.5.	Filtrado .....	13
2.3.5.1.	Control de filtración.....	14
2.3.6.	pH .....	15
2.4.	Equipos para determinar las propiedades de los fluidos .....	15
2.4.1.	Balanza de lodos.....	15
2.4.2.	Viscosímetro de lectura directa FANN.....	17
2.4.3.	Filtro prensa API .....	18

2.4.4.	pH-metro .....	19
2.5.	Química básica de los fluidos de perforación.....	19
2.5.1.	Composición de los fluidos.....	19
2.5.2.	Química del agua.....	20
2.5.2.1.	Agua dulce.....	21
2.5.2.2.	Agua salada .....	21
2.6.	Aditivos para los fluidos de perforación.....	22
2.6.1.	Densificantes .....	22
2.6.2.	Viscosificantes .....	22
2.6.3.	Controlador de filtrado o reductor de filtrado .....	22
2.6.4.	Controlador de pH.....	23
2.6.5.	Floculante .....	23
2.6.6.	Sistemas libres de sólidos (salmueras).....	24
2.7.	Fluidos de perforación base agua .....	24
2.7.1.	Fluidos dispersos .....	24
2.7.2.	Fluidos no dispersos .....	24
2.7.3.	Fluidos inhibidos y no inhibidos .....	24
2.7.4.	Fluidos no dispersos inhibidos .....	25
2.7.5.	Fluidos dispersos inhibidos .....	26
2.8.	Fluidos de perforación base aceite .....	26
2.9.	Fluido de sistema KLA SHIELD .....	27
2.10.	Chía (salvia hispánica) .....	28
2.10.1.	Descripción.....	28
2.10.2.	Cultivo.....	30
2.10.3.	Propiedades.....	30
2.10.4.	Uso.....	31

2.10.5.	Beneficios .....	31
2.11.	Problemas de perforación en formaciones arcillosas .....	31
2.12.	Formaciones arcillosas del Boomerang Hills .....	32
2.12.1.	Formación Yecua .....	32
2.12.2.	Formación Cajones .....	32
2.12.3.	Formación Petaca .....	33

### CAPÍTULO 3. APLICACIÓN PRÁCTICA EXPERIMENTAL

3.1.	Antecedentes y características del Boomerang Hill. ....	34
3.1.1.	Pozo VBR - 34D .....	37
3.1.2.	Pozo BQN - NX3 .....	39
3.1.3.	Pozo YPC - 41D.....	42
3.1.4.	Requisitos del lodo en formaciones arcillosas del Boomerang Hills .....	45
3.2.	Chía para la formulación de lodos.....	45
3.3.	Diseño experimental .....	46
3.3.1.	Plan experimental.....	46
3.3.2.	Operacionalización de variables.....	46
3.4.	Determinación de las densidades reales de los aditivos.....	47
3.4.1.	Primera determinación .....	51
3.4.2.	Segunda determinación .....	53
3.4.3.	Tercera determinación .....	56
3.4.4.	Cuarta determinación.....	58
3.4.5.	Densidades oficiales de los aditivos según pruebas .....	60
3.5.	Diagrama del proceso del fluido de perforación a partir de chía .....	61
3.6.	Determinación de densidad de la chía con agua (D1).....	63
3.7.	Primera prueba con D1 .....	65



3.8.	Segunda prueba con D1 .....	68
3.9.	Tercera prueba determinación de concentración de chía.....	71
3.10.	Cuarta prueba determinación de concentración de chía 1.....	75
3.11.	Quinta prueba determinación de concentración de chía 2 .....	78
3.12.	Sexta prueba determinación de concentración de chía 3.....	81
3.13.	Séptima prueba determinación de concentración de chía 4 .....	84
3.14.	Octava prueba determinación de concentración de chía 5 .....	88
3.15.	Novena prueba determinación de concentración de chía 6.....	91
3.16.	Décima prueba determinación de concentración de chía 7 .....	94
3.17.	Décima primera prueba determinación de concentración de chía 8 .....	97
3.18.	Proceso de tamizado de harina de chía molida en molienda. ....	101
3.19.	Determinación de densidad de la chía con aceite (D2).....	103
3.20.	Décimo segunda prueba con D2 .....	106
3.21.	Cálculo de la densidad real de la chía (D3) .....	110
3.22.	Décimo tercera prueba con D3 .....	111
3.23.	Décimo cuarta prueba con D3.....	120
3.24.	Resumen de las pruebas realizadas .....	124
3.25.	Análisis reológico del fluido con el programa MUDWARE .....	125
3.25.1.	Modelo reológico de Herschel-Bulkley .....	127
3.25.2.	Determinación de propiedades reológicas .....	130
3.25.3.	Determinación de la curva de viscosidad.....	131
3.25.4.	Determinación de la porosidad promedio .....	132
3.26.	Prueba de funcionalidad del fluido en una muestra arcillosa.....	135

3.26.1.	Análisis de las muestras grandes.....	138
3.26.1.1.	Análisis de las capturas con el microscopio .....	142
3.26.2.	Análisis de las muestras pequeñas.....	144
3.27.	Ventajas y desventajas .....	146
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ECONÓMICO		
4.1.	Masas de aditivos por Bbl de lodo a partir de chía. ....	147
4.2.	Masas de aditivos por Bbl de lodo con inhibidor de arcillas comercial .....	149
4.3.	Precios de los aditivos para un lodo a nivel internacional .....	154
4.4.	Volumen de lodo para formaciones arcillosas del Boomerang Hills .....	155
4.5.	Costo del fluido de perforación a partir de chía.....	156
4.6.	Costo del fluido de perforación con inhibidor de arcillas comercial .....	157
4.7.	Monto de ahorro .....	158
4.8.	Análisis Beneficio/Costo .....	159
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1.	Conclusiones.....	160
5.2.	Recomendaciones .....	161
BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA .....		
163		
ANEXOS.		
ANEXO A: Aditivos usados en laboratorio.....		
165		
ANEXO B: Equipos e imágenes de elaboración de lodo.....		
166		
ANEXO C: Determinación de flujograma de elaboración del lodo .....		
168		
ANEXO D: Determinación de la densidad por balanza de lodos.....		
170		
ANEXO E: Determinación de reología con viscosímetro FANN.....		
171		
ANEXO F: Determinación del filtrado por Filtro prensa API .....		
172		

Anexo G: Determinación del revoque.....	173
ANEXO H: Determinación de acidez por pH-metro .....	174
ANEXO I: Ficha técnica del inhibidor de arcillas comercial.....	175

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Área del Boomerang Hills en Bolivia .....	5
Figura 2.1. Sistema de circulación .....	7
Figura 2.2. Caracterización reológica de los fluidos.....	10
Figura 2.3. Diagrama de esfuerzo cortante vs Velocidad de corte .....	10
Figura 2.4. Esquema de filtración .....	14
Figura 2.5. Partes de la balanza de lodos.....	16
Figura 2.6. Partes del viscosímetro FANN .....	17
Figura 2.7. Partes del filtro prensa API .....	18
Figura 2.8. pH-metro de papel tradicional.....	19
Figura 2.9. Semillas de Chía .....	28
Figura 2.10. Mucílago de chía .....	29
Figura 2.11. Arcillas, rocas reservorio y daño de formación.....	32
Figura 3.1. Área de Boomerang Hills en Bolivia.....	34
Figura 3.2. Columna estratigráfica general del Boomerang Hills.....	36
Figura 3.3. Mapa de ubicación de la locación VBR – 34D.....	37
Figura 3.4. Esquema de pozo de VBR – 34D .....	38
Figura 3.5. Mapa de ubicación de la locación BQN - NX3.....	39
Figura 3.6. Esquema de pozo de BQN - NX3.....	40
Figura 3.7. Ubicación del pozo YPC – 41D en el mapa estructural .....	42
Figura 3.8. Esquema de pozo de YPC – 41D.....	43
Figura 3.9. Diagrama del proceso de fluido de perforación a partir de chía .....	62
Figura 3.10. Molido de granos de chía en licuadora.....	63
Figura 3.11. Pesado de la chía.....	63
Figura 3.12. Pesado de chía con agua.....	64
Figura 3.13. Puesto de venta de cereales procesados en molino.....	101
Figura 3.14. Tamizado de la chía en malla 40 .....	102
Figura 3.15. Tamizado de la chía en Malla 100 .....	102
Figura 3.16. Pesaje de la chía en balanza .....	103

Figura 3.17. Pesaje de la chía con aceite .....	104
Figura 3.18. Lectura del volumen en probeta.....	104
Figura 3.19. Calibración de la balanza de lodo con agua.....	113
Figura 3.20. Lodo en el vaso de la balanza .....	114
Figura 3.21. Lectura de densidad en equilibrio .....	114
Figura 3.22. Montaje del Viscosímetro FANN.....	115
Figura 3.23. Medición de viscosidad del lodo en RPM .....	115
Figura 3.24. Lecturas de RPM del viscosímetro .....	116
Figura 3.25. Montaje del equipo Filtro API con el lodo .....	117
Figura 3.26. Obtención del filtrado en probeta de 10ml .....	118
Figura 3.27. Extracción del revoque al desmontar .....	118
Figura 3.28. Datos de reología de la décimo tercera prueba .....	125
Figura 3.29. Modelo Herschel Bulkley con las lecturas de FANN .....	126
Figura 3.30. Modelo Herschel Bulkley con las viscosidades .....	127
Figura 3.31. Gráfica de velocidad de corte vs FANN .....	130
Figura 3.32. Gráfica de velocidad de corte vs Viscosidad cP .....	132
Figura 3.33. Medición del espesor del revoque con vernier .....	132
Figura 3.34. Pesaje del revoque húmedo .....	133
Figura 3.35. Pesaje del revoque seco.....	133
Figura 3.36. Pulido de las rocas.....	135
Figura 3.37. Rocas pulidas.....	136
Figura 3.38 Máquina cortadora .....	136
Figura 3.39. Cortado de muestras pequeñas .....	137
Figura 3.40. Muestras obtenidas.....	137
Figura 3.41. Lodos para las muestras.....	138
Figura 3.42. Microscopio Binocular EURONEX.....	138
Figura 3.43. Muestras en físico .....	139
Figura 3.44. Muestras en cajas de petri .....	139
Figura 3.45. Muestra con lodo de chía .....	140
Figura 3.46. Muestra con lodo simple .....	141

Figura 3.47. Capturas en microscopio de la muestra de lodo con chía .....	142
Figura 3.48. Capturas en microscopio de la muestra de lodo simple.....	143
Figura 3.49. Resultados de reposo después de dos semanas.....	144
Figura A.1. Carboximetilcelulosa y Goma Xantana en laboratorio .....	165
Figura A.2. Hidróxido de potasio y Bentonita en laboratorio .....	165
Figura A.3. Bentonita, Cloruro de potasio y Chía en laboratorio .....	165
Figura B.1. Pesaje de los aditivos en balanza precisa .....	166
Figura B.2. Pesaje del agua en balanza precisa.....	166
Figura B.3. Agitador o mixer de acero inoxidable con disco dispersor .....	166
Figura B.4. Mezclado de los aditivos.....	167
Figura B.5. Obtención del lodo final .....	167
Figura C.1. Determinación de flujograma I .....	168
Figura C.2. Determinación de flujograma II .....	168
Figura C.3. Determinación de flujograma III .....	169
Figura C.4. Determinación de flujograma IV.....	169
Figura D.1. Armado de la balanza calibrada en agua previamente.....	170
Figura D.2. Lodo en el vaso de la balanza .....	170
Figura D.3. Lectura de densidad en equilibrio .....	170
Figura E.1. Armado del Viscosímetro FANN.....	171
Figura E.2. Medición de viscosidad del lodo en RPM .....	171
Figura E.3. Lecturas de RPM del viscosímetro .....	171
Figura F.1. Montaje del equipo Filtro API con el lodo .....	172
Figura F.2. Obtención del filtrado en probeta de 10ml .....	172
Figura F.3. Extracción del revoque al desmontar .....	172
Figura G.1. Medición del espesor del revoque con vernier .....	173
Figura G.2. Pesaje del revoque húmedo .....	173
Figura G.3. Pesaje del revoque seco.....	173
Figura H.1. Medición de acidez de lodo con chía y sin chía .....	174
Figura H.2. Escala del pH-metro .....	174
Figura H.3. Lodos con su respectivo pH-metro medido.....	174

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Causas y efectos.....	2
Tabla 3.1.	Intervalos para programa de fluidos de perforación .....	38
Tabla 3.2.	Propiedades recomendadas para el fluido en VBR – 34D .....	39
Tabla 3.3.	Secuencia estratigráfica .....	41
Tabla 3.4.	Intervalos para programa de fluidos de perforación .....	41
Tabla 3.5.	Propiedades recomendadas para el fluido en BQN - NX3 .....	41
Tabla 3.6.	Secuencia estratigráfica del YPC – 41D .....	44
Tabla 3.7.	Intervalos para programa de fluidos de perforación .....	44
Tabla 3.8.	Propiedades recomendadas para el fluido en YPC – 41D .....	44
Tabla 3.9.	Propiedades de los fluidos en los tres campos .....	45
Tabla 3.10.	Requisitos de calidad que debe tener el fluido a formular .....	45
Tabla 3.11.	Variables dependientes e independientes.....	47
Tabla 3.12.	Dimensiones e indicadores .....	47
Tabla 3.13.	Aditivos para la formulación del lodo .....	48
Tabla 3.14.	Concentraciones y densidades de los aditivos .....	48
Tabla 3.15.	Valores para la primera determinación .....	51
Tabla 3.16.	Cálculo de masas primera determinación .....	53
Tabla 3.17.	Valores para la segunda determinación .....	53
Tabla 3.18.	Cálculo de masas segunda determinación .....	55
Tabla 3.19.	Valores para la tercera determinación.....	56
Tabla 3.20.	Cálculo de masas tercera determinación.....	57
Tabla 3.21.	Valores para la cuarta determinación .....	58
Tabla 3.22.	Cálculo de masas cuarta determinación.....	60
Tabla 3.23.	Densidades y concentraciones oficiales de aditivos .....	61
Tabla 3.24.	Valores para la primera prueba .....	65
Tabla 3.25.	Cálculo de masas para la primera prueba .....	67
Tabla 3.26.	Resultados del filtro API primera prueba.....	67
Tabla 3.27.	Valores para la segunda prueba.....	68

Tabla 3.28. Cálculo de masas para la segunda prueba.....	70
Tabla 3.29. Datos con viscosímetro FANN de la segunda prueba .....	70
Tabla 3.30. Valores para la tercera prueba.....	72
Tabla 3.31. Cálculo de masas para la tercera prueba.....	73
Tabla 3.32. Datos medidos con viscosímetro FANN de la tercera prueba .....	74
Tabla 3.33. Valores para la cuarta prueba .....	75
Tabla 3.34. Cálculo de masas para la cuarta prueba .....	76
Tabla 3.35. Datos medidos con viscosímetro FANN de la cuarta prueba.....	77
Tabla 3.36. Valores para la quinta prueba.....	78
Tabla 3.37. Cálculo de masas para la quinta prueba .....	80
Tabla 3.38. Datos medidos con viscosímetro FANN de la quinta prueba.....	80
Tabla 3.39. Valores para la sexta prueba.....	81
Tabla 3.40. Cálculo de masas para la sexta prueba .....	83
Tabla 3.41. Datos medidos con viscosímetro FANN de la sexta prueba .....	83
Tabla 3.42. Valores para la séptima prueba .....	85
Tabla 3.43. Cálculo de masas para la séptima prueba .....	86
Tabla 3.44. Datos medidos con viscosímetro FANN de la séptima prueba .....	87
Tabla 3.45. Valores para la octava prueba.....	88
Tabla 3.46. Cálculo de masas para la octava prueba.....	90
Tabla 3.47. Datos medidos con viscosímetro FANN de la octava prueba .....	90
Tabla 3.48. Valores para la novena prueba .....	91
Tabla 3.49. Cálculo de masas para la novena prueba .....	93
Tabla 3.50. Datos medidos con viscosímetro FANN de la novena prueba .....	93
Tabla 3.51. Valores para la décima prueba .....	94
Tabla 3.52. Cálculo de masas para la décima prueba .....	96
Tabla 3.53. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décima prueba .....	97
Tabla 3.54. Valores para la décima primera prueba.....	98
Tabla 3.55. Cálculo de masas para la décima primera prueba.....	99
Tabla 3.56. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décima primera prueba .....	100
Tabla 3.57. Valores para la décimo segunda prueba.....	107



Tabla 3.58.	Cálculo de masas para la décimo segunda prueba.....	108
Tabla 3.59.	Datos medidos con viscosímetro FANN de la décimo segunda prueba ....	109
Tabla 3.60.	Cálculo de la masa total del fluido.....	110
Tabla 3.61.	Valores para la décimo tercera prueba.....	111
Tabla 3.62.	Cálculo de masas para la décimo tercera prueba.....	113
Tabla 3.63.	Datos medidos con viscosímetro FANN de la décimo tercera prueba.....	116
Tabla 3.64.	Resultados filtro API décimo tercera prueba.....	119
Tabla 3.65.	Valores para la décimo cuarta prueba.....	120
Tabla 3.66.	Cálculo de masas para la décimo cuarta prueba.....	122
Tabla 3.67.	Datos medidos con viscosímetro FANN de la décimo cuarta prueba.....	122
Tabla 3.68.	Resultados filtro API décimo cuarta prueba.....	123
Tabla 3.69.	Resumen de pruebas realizadas.....	124
Tabla 3.70.	Resultados del viscosímetro FANN.....	128
Tabla 3.71.	Resultados de velocidad de corte.....	129
Tabla 3.72.	Determinación de los valores de viscosidad.....	131
Tabla 3.73.	Datos de densidad de aditivos.....	134
Tabla 3.74.	Tabla de ventajas y desventajas.....	146
Tabla 4.1.	Volúmenes del lodo a partir de chía de concentración 9.....	148
Tabla 4.2.	Cálculo de las masas en Kg.....	149
Tabla 4.3.	Propiedades del controlador de arcillas comercial.....	150
Tabla 4.4.	Concentración lodo con inhibidor de arcillas comercial.....	150
Tabla 4.5.	Cálculo de masas para la primera prueba.....	152
Tabla 4.6.	Porcentaje en volumen.....	153
Tabla 4.7.	Cálculo de las masas en Kg.....	154
Tabla 4.8.	Precios de los aditivos investigados.....	155
Tabla 4.9.	Propiedades de los fluidos en los tres campos.....	155
Tabla 4.10.	Datos de cantidades máscas y volumétricas de lodo con chía.....	156
Tabla 4.11.	Cantidades máscas y volumétricas de lodo simple.....	157
Tabla 4.12.	Cálculos para relación B/C.....	159

## RESUMEN EJECUTIVO

Un fluido de perforación es un compuesto químico que significa mucho al momento de la perforación de un pozo, ya que éste debe ser formulado en base a las características de la estratigrafía de la región.

El 5 de mayo de 2023 el presidente ejecutivo actual de la estatal petrolera, Armin Dorgathen anunció a nivel nacional que desarrollará un nuevo campo, donde aumentará al menos cuatro pozos más tras el descubrimiento de hidrocarburos en el pozo Yope-X1 en el campo del mismo nombre, también hay otros campos que están en etapa de estudio para ser desarrollados como el campo Yarará y otros ubicados en la misma área del Boomerang Hills.

Pero en reportes antiguos de otros campos como el Patujusal y Boqueron, informan que se tuvo problemas con las formaciones arcillosas como ser Petaca, Cajones y Yecua, es por esta razón que se decide formular un fluido de perforación base agua a partir del mucílago de la chía que tiene propiedades antioxidantes, es más amigable con el medio ambiente, posee iones de  $K^+$  y  $Mg^{++}$  que encapsularán a las formaciones arcillosas, formando una barrera protectora, evitando la desintegración de las formaciones por hinchamiento; de esta forma se mitigarán los problemas que se tenían con estas formaciones y acelerará el tiempo de perforación.

Para la formulación de este lodo de perforación se siguieron distintas pruebas experimentales en el laboratorio de Fluido de Perforación de los predios de Cota Cota, donde se logró obtener un fluido eco amigable y sobre todo factible ya que existen inhibidores comerciales ya desarrollados pero que resultan tener un mayor costo que el fluido de perforación base agua partir de la chía.

## ABSTRACT

A drilling fluid is a chemical compound that means a lot when drilling a well, since it must be formulated based on the characteristics of the stratigraphy of the region.

On May 5, 2023, the current executive president of the state oil company, Armin Dorgathen, announced at a national level that it will develop a new field, where at least four more wells will grow after the discovery of hydrocarbons in the Yope-X1 well in the same field. . name, there are also other fields that are in the study stage to be developed such as the Yarará field and others located in the same Boomerang Hills area.

But in old reports from other fields such as Patujusal and Boquerón, they report that there were problems with clay formations such as Petaca, Cajones and Yecua, it is for this reason that it was decided to formulate a water-based drilling fluid from the mucilage of the chia that has antioxidant properties, is more environmentally friendly, has  $K^+$  and  $Mg^{++}$  ions that will encapsulate, the clay formations, forming a protective barrier preventing the disintegration of the formations due to swelling; In this way, the problems that existed with these formations will be mitigated and drilling time will be accelerated.

For the formulation of this drilling mud, different experimental tests were followed in the Drilling Fluid laboratory of the Cota Cota properties, where it was possible to obtain an eco-friendly and, above all, feasible fluid since there are commercial inhibitors already developed but which turn out to have a higher cost than water-based drilling fluid made from chia.

# **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

## **1.1. Introducción**

El área del Boomerang Hills se caracteriza por ser zona hidrocarburífera que comprende distintos campos que fueron explotados durante más de 20 años; en la actualidad se está desarrollando sísmica 3D en la región de Yapacaní según la entrevista del 5 de mayo de 2023 en Radio FIDES, donde el presidente ejecutivo de la estatal petrolera Armin Dorgathen, anunció que desarrollará un nuevo campo llamado YOPE, donde aumentará al menos cuatro pozos más tras el descubrimiento de hidrocarburos en el pozo Yope-X1, en la perspectiva de delimitar el tamaño de la estructura con una sísmica 3D e incrementar la producción a 2.200 barriles por día aproximadamente de gas condensado teniendo como reservorio la formación Petaca.

## **1.2. Antecedentes**

Según un estudio realizado en la UTE de Ecuador el 2018 se demostró que una formulación de fluidos como inhibidor de arcilla basado en la semilla de chía es mucho más eficiente que un inhibidor comercial.

Un proyecto en la Universidad Fundación de América en la ciudad de Bogotá en Colombia desarrollo el estudio de una pintura en base a la semilla de chía como inhibidor anticorrosivo de tuberías de producción dando a resaltar las propiedades antioxidantes del gel característico de la chía.

## **1.3. Planteamiento del problema**

### **1.3.1. Identificación del problema**

Existe la necesidad de perforar otros pozos tras el nuevo descubrimiento, que serán desarrollados en los próximos años, que servirán para producir de las distintas formaciones hidrocarburíferas, también hay otros campos que están en etapa de estudio para ser desarrollados como el campo Yará y otros ubicados en la misma área.

Para este cometido se usan fluidos de perforación comerciales que causan un impacto ambiental considerable en estas áreas, ya que los estratos arcillosos se hinchan provocando problemas operativos como ser: aumento de torque, arrastre, pegadura de tubería y embolamiento del conjunto de perforación.

El área del boomerang Hills tiene 3 formaciones arcillosas que son Yecua, Cajones y Petaca según el reporte de perforación del campo Patujusal emitido por YPFB ANDINA S.A. que durante la perforación del segundo tramo se pudo notar taponamiento en la tubería por recortes en exceso de las formaciones mencionadas atribuyendo este contratiempo a las características arcillosas de estas formaciones.

### 1.3.2. Formulación del problema

En este proyecto de grado se estudiará la implementación de un fluido de perforación en base a la semilla de chíca (Salvia Hispánica), donde el mucílago que desprende gracias al agua, es el producto más importante por sus características gelificantes que puede convertirse en una barrera muy estable, mitigando los problemas mediante el encapsulamiento y siendo un producto de bajo impacto ambiental al degradarse, que lo hace más amigable que un lodo de perforación con inhibidor de arcillas que está elaborada en base a poliaminas que tardan años en degradarse.

**Tabla 1.1. Causas y efectos**

<b>CAUSA</b>	<b>EFEECTO</b>
<i>Formaciones arcillosas en el área de Boomerang Hills</i>	<i>Problemas en el arrastre de recortes por embolamiento</i>
<i>Hinchamiento de las arcillas por el agua del lodo</i>	<i>Pérdida de estabilidad en el pozo</i>
<i>Uso de inhibidores comerciales obtenido por medios químicos</i>	<i>Contaminación ambiental con químicos de tardía degradación</i>

Fuente: Elaboración propia

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Formular un fluido de perforación en base a la semilla de chía como inhibidor de arcillas.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar los requisitos generales que debe tener el fluido en base a información de tres pozos de distintos campos en el área del Boomerang Hills.
- Desarrollar pruebas preliminares para la formulación de un lodo de perforación a partir de la semilla de chía en el laboratorio de fluidos de Ingeniería Petrolera- UMSA.
- Analizar la reología del fluido a partir de chía con el programa MUDWARE
- Determinar la efectividad del fluido de perforación a partir de chía en base a pruebas experimentales en roca arcillosa del laboratorio de geología.
- Determinar el porcentaje de ahorro entre el análisis de costo del lodo a partir de chía y el análisis de costo del lodo con inhibidor comercial.

## **1.5. Justificación**

### **1.5.1. Justificación social**

El proyecto propone implementar este nuevo fluido de perforación en empresas que dan este servicio a la estatal petrolera, donde empresas proveedoras de chía nacionales serán beneficiadas, mejorando así la estabilidad del pozo que evitará pérdidas de tiempo y dinero durante la perforación de pozos en el tramo de formaciones arcillosas.

### **1.5.2. Justificación económica**

Debido al resultado positivo del pozo YOPE-X1 en el área del Boomerang Hills, los siguientes pozos perforados en el área podrán generar un campo productivo capaz de generar un ingreso significativo económico para la localidad, el

departamento y el país, además que se espera que el fluido de perforación a partir de chía sea más económico que un fluido con inhibidor de arcillas comercial.

### **1.5.3. Justificación técnica**

La empresa estatal YPFB fué quien programó la perforación del pozo Yope-X1, es decir, cuentan con la maquinaria requerida para flujo del caudal del fluido y en caso de desgaste de alguno de los equipos, ya cuentan con información de proveedores que se puede adquirir en Bolivia por medio de contratos con las empresas de servicio especializados en la tecnología de fluidos de perforación.

Por otro lado, la semilla de chía es producida en Bolivia en los departamentos de Santa Cruz y Chuquisaca por lo que será un insumo de fácil adquisición.

### **1.5.4. Justificación ambiental**

Esta aplicación reduce el impacto ambiental puesto que no habrá que utilizar agentes químicos que sean absorbidos por los estratos y tarden años en degradarse.

### **1.6. Viabilidad**

Este proyecto es viable debido a que se tiene la exploración en curso por parte de la empresa estatal YPFB la cual está actualmente con intenciones de realizar 4 a 6 pozos más para el desarrollo de varios campos en la misma área.

A nivel personal se cuenta con las herramientas intelectuales y el tiempo necesario que requiere el proceso investigativo.

La Compañía YPFB ya cuenta con maquinaria necesaria y competente.

A nivel empresarial, los altos mandos brindan la oportunidad para poder desarrollar el nuevo campo YOPE.

Así mismo al dar a conocer este nuevo descubrimiento a nivel nacional se interpreta que la empresa estatal YPFB cuenta con los recursos económicos para los gastos de materia prima necesarias, energía y maquinaria.

Respecto al material digital se cuenta con una laptop para realizar el documento, internet para obtener la información necesaria que cuenten con información de procedencia y la disponibilidad de la biblioteca de la carrera de Ingeniería Petrolera de la UMSA.

## **1.7. Alcance**

### **1.7.1. Alcance temático**

Está enmarcado en el área de Fluidos de perforación, tomando en cuenta información de Perforación petrolera y Geología.

### **1.7.2. Alcance geográfico o espacial**

Con este proyecto se pretende lograr implementar el uso de este fluido en estudio al tramo de formaciones arcillosas al área del Boomerang Hills.

**Figura 1.1. Área del Boomerang Hills en Bolivia**



Fuente: YPFB ANDINA S.A.

### **1.7.3. Alcance temporal**

Es de tipo Longitudinal debido a que se hará un estudio profundo por el lapso de 3 meses a más. En el área del diseño de investigación será Experimental porque se realizarán pruebas preliminares en laboratorio analizando cada una.



## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Definición de fluido de perforación**

El fluido de perforación o lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, como, por ejemplo: aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos (Romai Yrán, 2008).

#### **2.1.1. Especificaciones**

El fluido no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable, pero si inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales y estable a las altas temperaturas. Además, debe mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones, debe ser inmune al desarrollo de bacterias (Romai Yrán, 2008).

### **2.2. Funciones del fluido de perforación**

El fluido, es el elemento circulante que ayuda a solucionar los problemas de inestabilidad del hoyo durante la perforación del pozo.

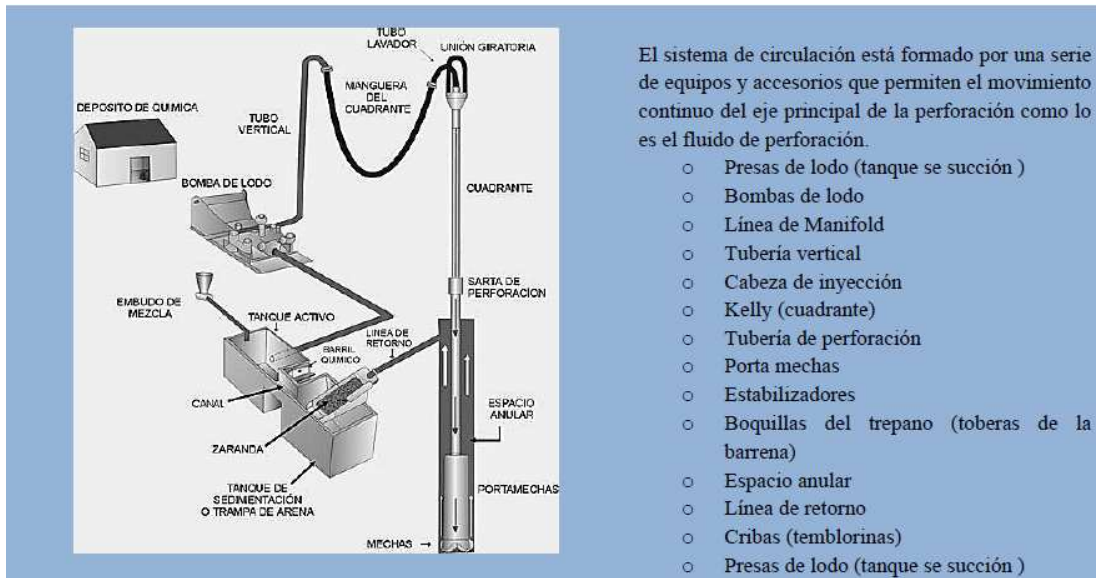
Los fluidos deben cumplir con funciones específicas que faciliten el avance de la perforación, minimizando problemas de estabilidad del hoyo y problemas operacionales. Es responsabilidad del especialista realizar ensayos físicos-químicos de acuerdo con las normas API para proceder a los ajustes necesarios que faciliten la consecución de los objetivos propuestos.

Durante la perforación de un pozo, es de vital importancia mantener la calidad del fluido dentro de los valores deseables y preestablecidos para evitar los problemas de inestabilidad del hoyo. Sin embargo, es necesario recordar que las propiedades de un fluido no son valores fijos, sino que pueden ser ajustados durante el proceso de la perforación.

En consecuencia, es responsabilidad del especialista tomar muestra del lodo a la entrada y salida del pozo para comparar valores y proceder a efectuar los ajustes necesarios.

En la Figura 2.1. se puede visualizar el recorrido o ciclo del fluido durante la perforación de un pozo (Romai Yrán, 2008).

**Figura 2.1. Sistema de circulación**



Fuente: Romai Yrán, 2008

### 2.2.1. Capacidad de transporte

La densidad, viscosidad y el punto cedente son las propiedades del fluido que, junto a la velocidad de circulación o velocidad anular, hacen posible la remoción y el transporte del ripio desde el fondo del hoyo hasta la superficie (Romai Yrán, 2008).

### 2.2.2. Enfriar y lubricar

El fluido de perforación facilita el enfriamiento de la mecha al expulsar durante la circulación el calor generado por la fricción mecánica entre la mecha y la formación.

En cierto grado, por sí mismo, el fluido actúa como lubricante y esta característica puede incrementarse con aceite o cualquier producto químico elaborado para tal fin (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.3. Formar revoque**

Para minimizar los problemas de derrumbe y atascamiento de tubería en formaciones permeables, es necesario cubrir la pared del hoyo con un revoque liso, delgado, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible. El revoque se logra incrementando la concentración y dispersión de los sólidos arcillosos (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.4. Controlar la presión de la formación**

El fluido de perforación ejerce una presión hidrostática en función de la densidad y altura vertical del pozo, la cual debe controlar la presión de la formación, evitando un influjo hacia el pozo. Esta presión no depende de la geometría del hoyo (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.5. Capacidad de suspensión**

La resistencia o fuerza de gel es la propiedad reológica del fluido que permite mantener en suspensión las partículas sólidas cuando se interrumpe la circulación. Esta propiedad retarda la caída de los sólidos, pero no la evita (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.6. Flotabilidad**

La sarta de perforación y la tubería de revestimiento pierden peso cuando se introducen en el hoyo, debido al factor de flotación, el cual depende de la densidad o peso del fluido. En consecuencia, para calcular el peso de la sarta en el fluido, se multiplica su peso en el aire por el factor de flotación (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.7. Estabilidad**

La estabilidad de las formaciones permeables se logra con peso y revoque de calidad, y las impermeables con peso, cuando se trata de lutitas presurizadas, y con inhibición a con fluido cien por ciento aceite, cuando se trata de Lutitas reactivas (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.8. Evaluación**

El fluido debe tener una alta calidad para facilitar la toma de núcleos y la evaluación de las formaciones perforadas, sobre todo cuando se trata de la zona productora (Romai Yrán, 2008).

### **2.2.9. Hidráulica**

El fluido es el medio por el cual se transmite la potencia desde la superficie hasta el fondo del pozo. El programa hidráulico, trata de obtener la máxima caída de presión en la mecha para seleccionar los valores óptimos de caudal y chorros, que faciliten una limpieza efectiva del fondo del hoyo y del espacio anular (Romai Yrán, 2008).

## **2.3. Propiedades de los fluidos de perforación**

Las propiedades de los fluidos son sumamente importantes para mantener su calidad. Además, de los ajustes necesarios que deben realizarse de acuerdo al comportamiento de la perforación (API, 2014).

De acuerdo con el **Instituto Americano del Petróleo (API)**, las propiedades del fluido a mantener durante la perforación se describen de la siguiente manera:

### **2.3.1. Densidad o peso.**

Es la propiedad del fluido que tiene por función principal mantener en sitio los fluidos de la formación. La densidad se expresa por lo general en lbs/gal, y es uno de los dos factores, de los cuales depende la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido. Durante la perforación de un pozo se trata de mantener una presión hidrostática ligeramente mayor a la presión de la formación, para evitar en lo posible una arremetida, lo cual dependerá de las características de la formación (API, 2014).

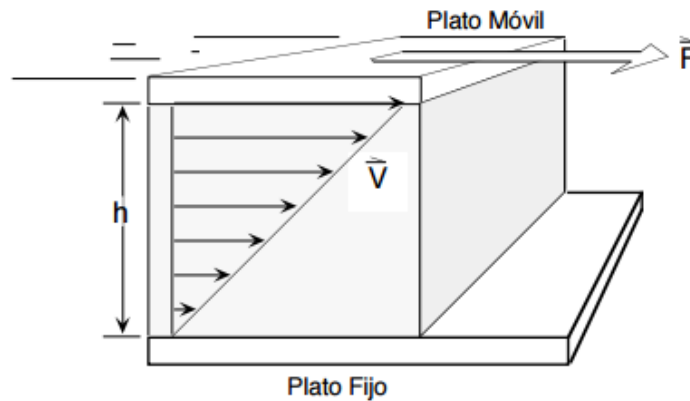
### **2.3.2. Reología**

La reología es la ciencia de la deformación de los materiales (si son sólidos) o de su flujo (si son líquidos) bajo un esfuerzo aplicado.

En caso de fluidos de perforación la reología es el estudio la reología es el estudio de las características que definen el flujo y las propiedades gelatinizantes del mismo. (Schlumberger, 2018)

En la Figura 2.2. se observa una fuerza constante aplicada a un área en específico:

**Figura 2.2. Caracterización reológica de los fluidos**



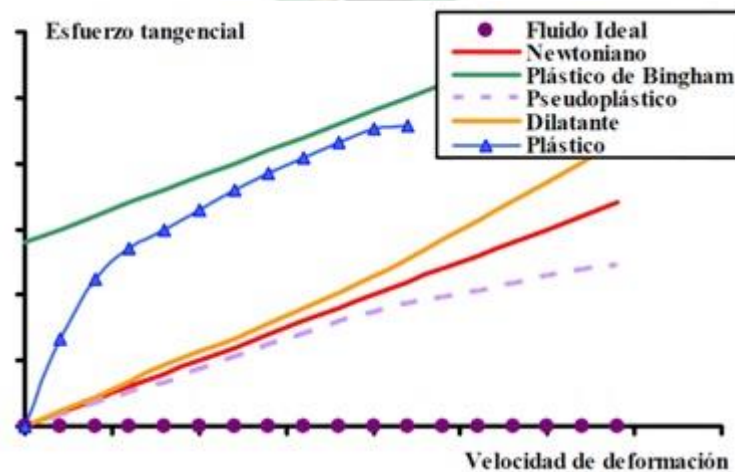
Fuente: Schlumberger, 2018

La resistencia o fuerza de fricción es el **esfuerzo cortante**.

La diferencia en las velocidades dividida entre la distancia entre las plaquetas se llama **velocidad de corte**.

Los modelos de reología son las siguientes de la Figura 2.3:

**Figura 2.3. Diagrama de esfuerzo cortante vs Velocidad de corte**



Fuente: Schlumberger, 2018

### 2.3.2.1. Fluidos newtonianos

Es la relación lineal o constante entre la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte (esfuerzo cortante o densidad de flujo viscoso de transporte de cantidad de movimiento) como se observa en la Figura 2.3 (Carrasco V., Castañeda P., & Altamirano O., 2015).

Esta relación matemática se denomina ecuación constitutiva y está expresada de la siguiente manera:

$$\tau = \mu * \gamma \quad (1)$$

Donde:

$\tau$ : es el esfuerzo de corte

$\gamma$ : rapidez de deformación

$\mu$ : Al sustituir esta ecuación constitutiva en la ecuación de la viscosidad se obtiene que la viscosidad es una constante igual a  $\mu$ . por lo que cuando se habla de la viscosidad se está haciendo referencia a un fluido newtoniano (Méndez-Sánchez, Pérez-Trejo, & Pani, 2010).

### 2.3.2.2. Fluidos no newtonianos

En estos fluidos la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación no es proporcional, por lo tanto, no cumplen la ley de Newton (Carrasco V., Castañeda P. & Altamirano O., 2015).

Modelo Plástico de Bingham Un modelo que se ha utilizado con frecuencia para caracterizar las propiedades de flujo del lodo de perforación es el Modelo Plástico de Bingham.

$$T = T_y + \mu_p * Y \quad (2)$$

El esfuerzo cortante es igual al esfuerzo cortante a velocidad de corte cero + la velocidad de aumento de esfuerzo cortante con una velocidad de corte en aumento x velocidad de corte.

Donde:

$T$  = (Esfuerzo cortante a velocidad cortante cero) se le llama punto de cedencia.

$\mu$  = (Velocidad de aumento del esfuerzo cortante con el aumento de velocidad cortante) se le llama viscosidad plástica.

(Carrasco V., Castañeda P., & Altamirano O., 2015).

### **2.3.3. Viscosidad plástica**

Es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica entre:

- Sólidos
- Sólidos y líquidos
- Líquido y líquidos

Esta viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido, y se controla con equipos mecánicos de Control de Sólidos. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (ROP).

Una baja viscosidad plástica aunada a un alto punto cedente permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración.

Las mediciones de la Viscosidad Plástica y del Punto de Cedencia son extremadamente útiles para determinar la causa de viscosidades anormales en los fluidos de perforación.

La Viscosidad Plástica es la parte de resistencia al flujo causada por la fricción mecánica. Altas concentraciones de sólidos llevan a una alta fricción que aumentará la viscosidad plástica. El disminuir el tamaño de los sólidos a volumen constante también aumenta la Viscosidad Plástica debido a que hay un aumento

en el área de contacto entre las partículas lo que aumenta la fricción (Romai Yrán, 2008).

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (3)$$

#### 2.3.4. Punto cedente

Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento.

El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de formación. Un fluido floculado exhibe altos valores de punto cedente.

La floculación se controla de acuerdo al causante que lo origina. Se usan adelgazantes químicos cuando es causada por excesos de sólidos arcillosos y agua cuando el fluido se deshidrata por altas temperaturas.

El Punto de Cedencia, el segundo componente de resistencia al flujo de un fluido de perforación, es la medida de una fuerza electro-químicas o de atracción en el lodo. Estas fuerzas son el resultado de cargas positivas o negativas localizadas cerca de la superficie de las partículas (Romai Yrán, 2008).

$$Yp = \theta_{300} - Vp \quad (4)$$

#### 2.3.5. Filtrado

El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables, cuando el fluido es sometido a una presión diferencial como en la Figura 2.4.

Los siguientes problemas ocurren debido al control inadecuado de la filtración:

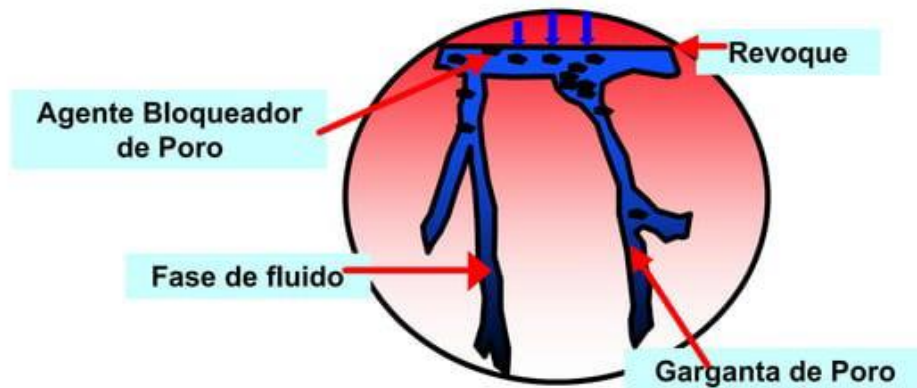
- Puntos apretados (de diámetro reducido) en el agujero que causan fricción excesiva.



- Incrementos en la presión de surgencia (succión) al mover la sarta en un agujero de diámetro reducido.
- Pegaduras por presión diferencial de la sarta de perforación debido a un área de contacto de la sarta de perforación recostada contra la formación, aumentada por un revoque grueso y por la rápida acumulación de fuerza de pegadura en revoque de la zona de alta permeabilidad.
- Problemas de cementación primaria debido a un mal desplazamiento de lodo deshidratado y revoques de filtración excesivamente gruesos.
- Problemas para la evaluación de formación por invasión excesiva de filtrado y revoques de filtración demasiado grueso.
- Daño excesivo de formación por el filtrado de todo.

(Romai Yrán, 2008)

**Figura 2.4. Esquema de filtración**



Fuente: Schlumberger, 2018

### 2.3.5.1. Control de filtración

La formación de un revoque delgado y apretado protegerá contra la invasión de filtrados del fluido de perforación hacia las formaciones

El control de filtración se logra en los fluidos de perforación mediante la adición de arcilla bentonítica, polímeros para control de pérdida de fluido, lignitos, resinas, etc.

Una práctica común es reducir aún más la velocidad de filtración del fluido de perforación antes de perforar la formación del yacimiento.

En muchos casos la formación del yacimiento se perfora con fluidos limpios (sin arcilla) para prevenir que se formen emulsiones y taponen la formación. Estos fluidos están formulados con polímeros y con sólidos inertes de tamaño adecuado para bloqueo como el Carbonato de Calcio (Romai Yrán, 2008).

### **2.3.6. pH**

El pH indica si el lodo es ácido o básico. La mayoría de los fluidos base acuosa son alcalinos y trabajan con un rango de pH entre 7.5 a 11.5. Cuando el pH varía de 7.5 a 9.5, el fluido es de bajo pH y cuando varía de 9.5 a 11.5, es de alto pH, lo que los lodos de perforación deben ser del alto pH es decir básicos (Romai Yrán, 2008).

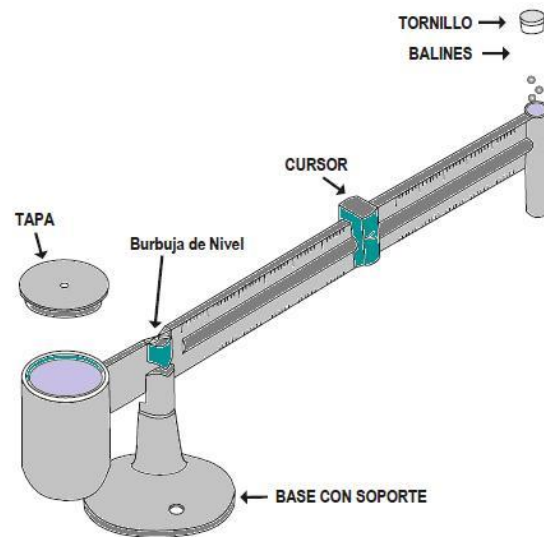
## **2.4. Equipos para determinar las propiedades de los fluidos**

Para explicar los equipos que usan en el análisis de las propiedades del fluido se utilizan las normas del Instituto Americano del Petróleo (API) (Romai Yrán, 2008).

### **2.4.1. Balanza de lodos**

La balanza permite conocer, además de la densidad en lbs/gal, la gravedad específica y el gradiente de presión por cada mil pies que se muestra en la Figura 2.5 (Romai Yrán, 2008).

**Figura 2.5. Partes de la balanza de lodos**



Fuente: Pérez Reina, 2011

La calibración consiste en:

- a) Llenar la copa de la balanza con agua limpia
- b) Colocar la tapa sobre la copa y asentarla firmemente, pero en forma lenta con un movimiento giratorio. Asegúrese que el exceso de agua salga por el orificio de la tapa
- c) Colocar el dedo pulgar sobre el orificio de la tapa y limpiar la balanza con un trapo seco.
- d) Colocar la balanza sobre el soporte y mover el cursor a lo largo del brazo graduado hasta que la burbuja del nivel indique la nivelación correcta
- e) Leer la densidad o peso del agua en el lado izquierdo del cursor. Esta debe ser de 8.33 en lbs/gal o 62.4 en lb/pc. En caso de no obtener la densidad correcta, procédase a retirar el tornillo ubicado en el extremo del brazo de la balanza para agregar o quitar balines hasta lograr la calibración.

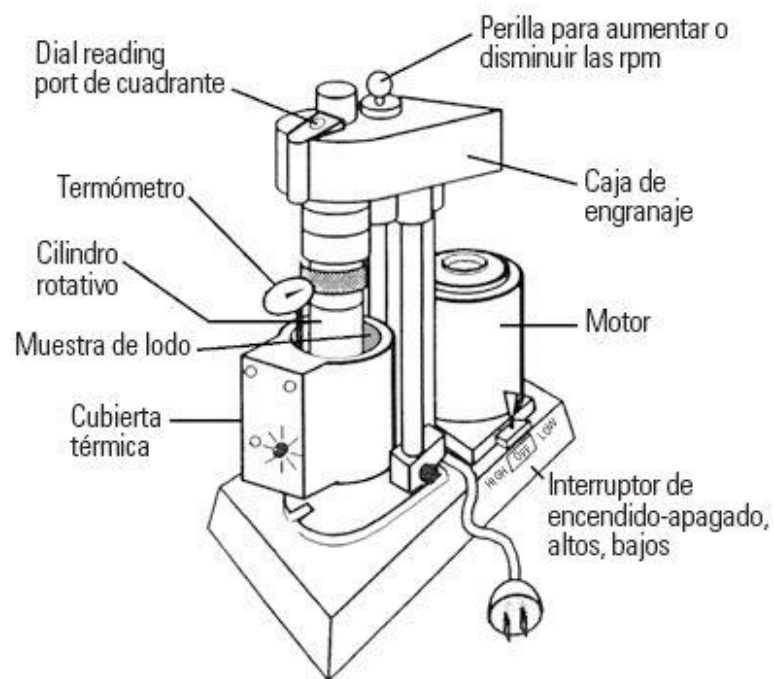
(Romai Yrán, 2008).

### 2.4.2. Viscosímetro de lectura directa FANN

El viscosímetro se utiliza para determinar las propiedades reológicas del fluido, es decir, la viscosidad plástica, el punto cedente y la fuerza de gel.

Este aparato mostrado en la Figura 2.6. está constituido por un rotor que gira dentro de una taza mediante un motor eléctrico. Una caja de velocidades, que actúa mediante un sistema de engranaje, hace girar el rotor a diferentes velocidades. Al girar el rotor produce un cierto arrastre al bob. Este arrastre se mide mediante una balanza de torsión, que indica la fuerza desarrollada en un dial graduado (Romai Yrán, 2008).

**Figura 2.6. Partes del viscosímetro FANN**



Fuente: Schlumberger 2018

La calibración consiste en:

- Medir la temperatura de calibración con el termómetro graduado a 0.1. Esta temperatura debe estar en el rango de la tabla de viscosidad versus temperatura que viene con el fluido de calibración.

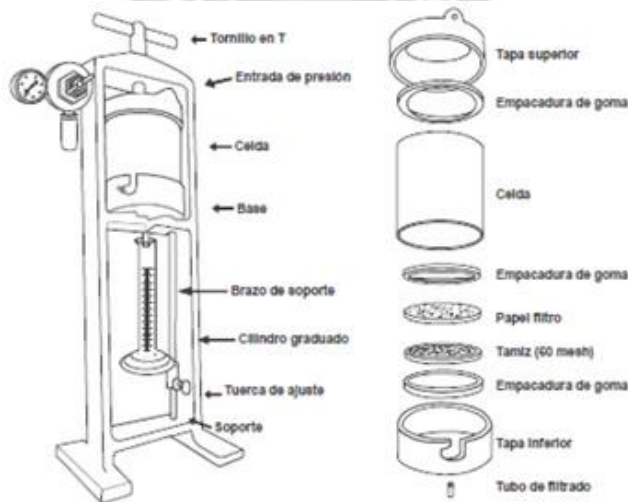
- b) Llenar la taza del viscosímetro con el fluido de calibración de 100 cps hasta donde lo indique la marca, con la temperatura ya ajustada en el rango de la tabla, y luego coloque la taza en el viscosímetro, haciendo coincidir el nivel del fluido con la marca que tiene el cilindro exterior (Rotor).
- c) Encender el viscosímetro a 300 y 600 rpm por tres minutos en cada lectura. La lectura de 300 r.p.m. es la lectura teórica correspondiente a la viscosidad en cps. La desviación aceptada a 300 r.p.m. es  $\pm 1.5$  cps y la lectura de 600 r.p.m. debe ser dividida entre 1.98. La desviación aceptada de  $\pm 2$  cps.

(Romai Yrán, 2008).

### 2.4.3. Filtro prensa API

Los filtros prensas cumplen con las especificaciones API 13B-1 de la norma API para determinar el filtrado o pérdida de agua que pasa hacia la formación permeable cuando el fluido es sometido a una presión diferencial mostrado en la Figura 2.7.

**Figura 2.7. Partes del filtro prensa API**



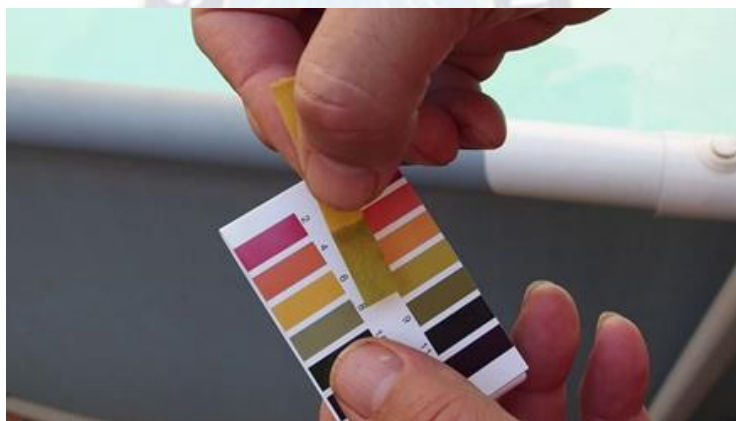
Fuente: PERFORADOR2.0, 2017

API recomienda verificar el tamaño y las condiciones de las empaaduras de los filtros prensa y cualquier fuga que pueda existir, sobre todo en el Filtro prensa HP-HT (Romai Yrán, 2008).

#### **2.4.4. pH-metro**

Una forma de medición es mediante el papel pH-metro como la Figura 2.8, un ejemplo de lectura es, el pH 4 es diez veces más ácido que el pH 5 y 100 veces (10 veces 10) más ácido que el pH 6. Lo mismo se aplica a los valores de pH superiores a 7, cada uno de los cuales es diez veces más alcalino que el siguiente entero inferior (Romai Yrán, 2008).

**Figura 2.8. pH-metro de papel tradicional**



Fuente: Yrán Romai, 2008

El pH-metro es un instrumento utilizado para determinar el pH de soluciones acuosas, midiendo el electro-potencial generado entre el electrodo especial de vidrio y el electrodo de referencia (Romai Yrán, 2008).

### **2.5. Química básica de los fluidos de perforación**

#### **2.5.1. Composición de los fluidos**

El fluido de perforación o lodo, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas; como ejemplo: aire

o gas, agua, petróleo o combinación de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos.

La composición de un fluido depende de las exigencias de cada operación de perforación en particular. La perforación debe hacerse atravesando diferentes tipos de formaciones, que, a la vez, pueden requerir diferentes tipos de fluidos. Por consiguiente, es lógico que varias mejoras sean necesarias efectuarle al fluido para enfrentar las distintas condiciones que se encuentran a medida que avance la perforación.

El fluido debe ser:

- Inerte a las contaminaciones
- Estable a altas temperaturas
- Inmune al desarrollo de bacterias

En general, los fluidos no necesitan ser complicados o difíciles de preparar y prueba de ello, es que, para algunas operaciones de perforación, un "agua sucia" puede dar buenos resultados.

En algunas áreas se puede iniciar la perforación con agua y arcillas de formación, creando así un fluido de iniciación CBM razonablemente bueno. En otras áreas pueden encontrarse formaciones como calizas, arenas o gravas que no forman fluido. En tales casos será necesario agregar arcillas comerciales para suspender la barita, aumentar la capacidad de acarreo y controlar la pérdida de agua.

El fluido de perforación no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable para evitar daños a la salud y al medio ambiente (Romai Yrán, 2008).

### **2.5.2. Química del agua**

El agua es un fluido newtoniano, que constituye la fase continua de los fluidos de base acuosa

El agua utilizada en la perforación y mantenimiento de los fluidos de base acuosa puede ser: dulce o salada (Romai Yrán, 2008).

### **2.5.2.1. Agua dulce**

El agua es ideal para perforar zonas de bajas presiones, es económica, abundante, no requiere tratamiento químico y provee el mejor líquido en el uso de los métodos de evaluación de formaciones. El agua dispersa sólidos, facilitando su remoción a través de los equipos mecánicos de control de sólidos. Cuando contiene calcio o magnesio, se le conoce con el nombre de agua dura. Estos iones disminuyen el rendimiento de las arcillas y alteran el comportamiento reológico del fluido. Por tal razón, es conveniente determinar la dureza del agua antes de iniciar la preparación del fluido y proceder, en caso necesario, a pretratarla con Soda Ash para precipitar esos contaminantes:

Tiene las siguientes propiedades:

- Densidad: 8.33 lbs/gal; 62.4 lbs/pc; 350 lbs/bbl
- Gradiente: 0.433 psi/pie @70°F
- Viscosidad Embudo: 26 seg. 1/4 gal.
- Viscosidad Plástica: 1 cp
- Punto Cedente: 0
- pH:7
- Peso Molecular: 18
- Índice de Comportamiento de Flujo: 1.0

(Romai Yrán, 2008).

### **2.5.2.2. Agua salada**

La sal es una sustancia que da aniones distintos al ión  $\text{OH}^-$  y cationes distintos al ión  $\text{H}^+$ .

Al mezclar sal con agua se obtiene una salmuera, utilizada con mucha frecuencia como fluido de completación y rehabilitación de pozos, por ser un sistema libre de sólidos que causa mínimo daño a la formación (Romai Yrán, 2008).



## **2.6. Aditivos para los fluidos de perforación**

### **2.6.1. Densificantes**

Son aditivos químicos, no tóxicos ni peligrosos de manejar, que se utilizan para incrementar la densidad del fluido y, en consecuencia, controlar la presión de la formación y los derrumbes que ocurren en aquellas áreas que fueron tectónicamente activas.

La **Barita** es Sulfato de Bario ( $BaSO_4$ ) natural, que contiene generalmente 65,7% de BaO y 34,3% de  $SO_3$ ; su color varía de gris claro a marrón. Es un material inerte, molido en diferente granulometría y está clasificada como sedimento, siendo su tamaño promedio es de 44  $\mu m$ , se puede observar en el ANEXO A.

Con la Barita es posible alcanzar densidades de 20 lbs/gal; sin embargo, cuando sea necesario utilizar densidades mayores, se recurre a minerales con mayores gravedades específicas. (Romai Yrán, 2008).

### **2.6.2. Viscosificantes**

Son aditivos químicos que son agregados a los fluidos para mejorar la habilidad de los mismos de remover los sólidos perforados y suspender el material densificante, durante la perforación de un pozo. Sin embargo, no todos los viscosificantes potenciales van a brindar una limpieza efectiva y económica del hoyo, y tampoco se hallan totalmente a salvo de las interferencias mecánicas y químicas del medio ambiente.

Entre los materiales más utilizados para viscosificar los fluidos de perforación está la Goma Xantana (Romai Yrán, 2008).

### **2.6.3. Controlador de filtrado o reductor de filtrado**

El filtrado o pérdida de agua es el pase de la fase líquida del fluido hacia la formación permeable, cuando el fluido es sometido a una presión diferencial, son aditivos químicos. Entre los principales polímeros usados para controlar filtrado

en sistemas poliméricos está el CMC (Carboxi Metil-Celulosa) y los Poliacrilato de Sodio.

El control de filtrado o pérdida de agua en fluidos poliméricos se logra agregando aditivos orgánicos. Estos aditivos incrementan la viscosidad de la fase líquida y se adhieren alrededor de las partículas de arcillas, causando un taponamiento mecánico de la formación que permite reducir el pase de la fase líquida del fluido hacia la formación.

(Romai Yrán, 2008).

#### **2.6.4. Controlador de pH**

Para mantener un rango de pH en el sistema que asegure el máximo desempeño de los otros aditivos empleados en la formulación del fluido se utilizan aditivos alcalinos en concentración que varía de acuerdo al pH deseado.

El pH puede variar entre 7.5 y 9.5 para un fluido de bajo pH. y entre 9.5 y 11.5 para un fluido de alto pH, de acuerdo a la exigencia de la perforación. Entre los materiales suplidores de iones OH están los siguientes: Soda Caustica NaOH, Hidróxido de Potasio KOH, Cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Romai Yrán, 2008).

#### **2.6.5. Floculante**

Materiales para flocular Durante las operaciones de perforación se generan una gran cantidad de sólidos que deben ser removidos del sistema de circulación lo antes posible y en forma eficiente. La floculación se logra mediante la atracción o reemplazo de cargas causadas por polímeros, mientras que la coagulación es lograda por la modificación de cargas causada por sales minerales.

Con estos dos procesos se logra incrementar el tamaño de los sólidos coloidales para facilitar su remoción a través de una centrifuga de altas revoluciones. Los materiales que se usan con más frecuencia como agentes floculantes son: Sales, cal hidratada, polímeros sintéticos, goma xantana, polímeros acrílicos (Romai Yrán, 2008).

### **2.6.6. Sistemas libres de sólidos (salmueras)**

Las soluciones salinas o salmueras son fluidos libre de sólidos, conocidas comúnmente como Sistemas de Agua Clarificada. Estos sistemas se usan principalmente como fluidos de completación o reparación de pozos.

Cloruro de Potasio (KCL): Es un polvo higroscópico que absorbe humedad del aire con facilidad, razón por la cual debe ser almacenado bajo techo para mantenerlo seco. Es de fácil disolución.

El cloruro de potasio (KCL) se utiliza para formular sistemas libres de sólidos (salmueras), utilizados como fluidos de completación o reparación de pozos (Romai Yrán, 2008).

### **2.7. Fluidos de perforación base agua**

Los fluidos base agua son aquellos cuya fase líquida o continua es agua. Estos sistemas son muy versátiles y se utilizan por lo general para perforar formaciones no reactivas, productoras o no productoras de hidrocarburos.

Los fluidos de perforación de base acuosa se clasifican en dispersos y no dispersos, de acuerdo al efecto que tienen sobre los sólidos perforados y sobre las arcillas agregadas (Romai Yrán, 2008).

#### **2.7.1. Fluidos dispersos**

Estos fluidos contienen adelgazantes químicos.

#### **2.7.2. Fluidos no dispersos**

Al contrario de los fluidos dispersos, éstos no contienen adelgazantes químicos. En este caso, las arcillas agregadas o incorporadas encuentran su propia condición de equilibrio de una forma natural (Romai Yrán, 2008).

#### **2.7.3. Fluidos inhibidos y no inhibidos**

Los fluidos dispersos y los no dispersos pueden estar o no inhibidos. El término no inhibido se refiere a la ausencia total de iones inhibidores de lutitas, como:

potasio, calcio o sodio. En cambio, un fluido tiene propiedades inhibitorias cuando contiene cationes o agentes encapsulantes en cantidades suficientes, por tal razón los fluidos inhibitorios de base acuosa reducen o inhiben la interacción entre el fluido y las arcillas de formación. Este tipo de fluido es utilizado para perforar formaciones reactivas o formaciones lutíticas sensibles al agua (Romai Yrán, 2008).

#### **2.7.4. Fluidos no dispersos inhibidos**

Estos fluidos no contienen adelgazantes químicos, pero si contienen iones inhibidores de lutitas, como: potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca) o magnesio (Mg).

Ion potasio (K): Este ion es el que posee mayor capacidad inhibitoria por su baja energía de hidratación y por su reducido tamaño (2.65 Å), motivo por el cual, se utiliza en la mayoría de los fluidos base agua, para incrementar su capacidad inhibitoria. Este ion es efectivo tanto en el desplazamiento de cationes monovalentes (Sodio) como de cationes divalentes (Calcio), lo cual es de suma importancia porque la mayoría de las lutitas hidratables son montmorillitas sódicas. El ion potasio inhibe el hinchamiento de las arcillas a bajas concentraciones (3-5% en peso), sin embargo, a concentraciones mayores (>10% en peso) el hinchamiento comienza a aumentar, debido al incremento de la repulsión electrostática entre las capas de las arcillas por exceso de cationes.

Estudios realizados han demostrado que la disminución de la hidratación y la dispersión de las arcillas resulta más efectiva cuando se mezcla potasio y polímeros no iónicos, que cuando se utiliza el ion solo. Como fuente primaria de potasio se utiliza básicamente el KCL.

Advertencia: Es posible que los inhibidores salinos como potasio, sodio, genere niveles no permisibles que conviertan al fluido en pasivo ambiental de costosa remediación, es decir, que el tratamiento de los ripsos durante el proceso de biotratamiento podría resultar costoso (Romai Yrán, 2008).

### **2.7.5. Fluidos dispersos inhibidos**

Los fluidos dispersos inhibidos utilizan adelgazantes químicos para dispersar los sólidos arcillosos perforados y también, iones inhibidores para evitar la hidratación y debilitamiento de las lutitas. Dentro de esta clasificación, se encuentran los fluidos de base calcio.

Fluido de base calcio: Estos fluidos se utilizan en áreas donde la hidratación y el hinchamiento de las lutitas causan una significativa inestabilidad del hoyo. En estos fluidos se mantienen mayores niveles de calcio solubles, para lograr un ambiente inhibitor y minimizar el hinchamiento de las arcillas (Romai Yrán, 2008).

### **2.8. Fluidos de perforación base aceite**

Los fluidos base aceite son aquellos cuya fase continua, al igual que el filtrado, es puro aceite. Pueden ser del tipo de emulsión inversa o cien por ciento (100%) aceite.

Las emulsiones inversas son utilizadas para:

- 1) Perforar lutitas problemáticas utilizando el concepto de actividad balanceada
- 2) Prevenir pérdidas de circulación en formaciones con bajo gradiente de presión
- 3) Perforar hoyos con alto gradiente de temperatura
- 4) Perforar hoyos direccionales
- 5) Perforar formaciones de gases ácidos
- 6) Perforar formaciones de anhidrita o de yeso
- 7) Prevenir atascamiento de tubería
- 8) Minimizar problemas de torque y arrastre

(Romai Yrán, 2008).

## 2.9. Fluido de sistema KLA SHIELD

El sistema KLA-SHIELD es un fluido a base de poliamina, diseñado como un sistema inhibidor de nivel medio base agua con polímeros mejorados, emplea una amplia gama de poliaminas. Esta composición lo hace ideal en las zonas donde las directrices ambientales sean consideradas.

El Fluido KLA-SHIELD está compuesto por los siguientes aditivos: inhibidor de arcillas, densificantes (barita), agente gelificante (gel), antiespumante, surfactante (mejora ROP), controladores de pérdida de fluidos, soda caustica, controladores de pH, píldoras de barrido (sweep pills) y dispersante (Zajia, 2010).

El sistema KLA-SHIELD utiliza tres mecanismos diferentes para inhibir el hinchamiento y la dispersión de arcilla.

- KLA-STOP: Es un aditivo de esquisto poliamina líquido que inhibe eficazmente y reduce al mínimo el potencial de formación de flóculos.
- IDCAP D: Es un copolímero de ácido acrílico de bajo peso molecular, está diseñado para encapsular y evitar la dispersión de arcillas.
- ULTRACAP: Es un copolímero de acrilamida seco y de bajo peso molecular, diseñado para encapsular recortes e inhibir la dispersión de las arcillas.

Características y beneficios del sistema KLA-SHIELD:

- Base de poliamina para obtener un rendimiento medioambiental mejorado respecto a los sistemas a base de cloruro de potasio.
- Es lo suficientemente flexible como para satisfacer los requisitos de rendimiento y geológicos.
- Ideal para la perforación de pozos de alto ángulo en formaciones de esquistos.
- Más tolerante a la contaminación con sólidos de perforación.

(Zajia, 2010).

## 2.10. Chía (salvia hispánica)

Salvia hispánica, de nombre común chía, es una planta herbácea de la familia de las lamiáceas; es nativa del centro y sur de México, El Salvador, Guatemala, Nicaragua, Costa Rica y Paraguay. Junto con el lino (*Linum usitatissimum*), es una de las especies vegetales con la mayor concentración de ácido graso alfa-linolénico omega 3 conocidas hasta 2006. Se cultiva por ello para aprovechar sus semillas, que se utilizan como alimento, en la Figura 2.9 y Figura 2.10 se pueden observar la chía sólida y con desprendimiento de mucilago respectivamente (Blog salud MAPFRE, 2019).

**Figura 2.9. Semillas de Chía**



Fuente: Blog salud MAPFRE, 2019

### 2.10.1. Descripción

Es una planta herbácea anual de hasta 1 m de altura y presenta hojas opuestas de 4-8 cm de largo por 3-5 cm de ancho. Las flores son hermafroditas, entre purpúreas y blancas, y brotan en ramilletes terminales. La planta florece entre julio y agosto en el hemisferio norte; al cabo del verano, las flores dan lugar a un fruto en forma de aquenio indehiscente cuya semilla es rica en mucílago, fécula y aceite; tiene unos 2 mm de largo por 1,5 mm de ancho, 1 mm de alto y es ovalada y lustrosa, de color pardo-grisáceo a rojizo.

- Mucílago. El mucílago es una sustancia vegetal viscosa, coagulable al alcohol. También es una solución acuosa espesa de una goma o dextrina

utilizada para suspender sustancias insolubles y para aumentar la viscosidad. Los mucílagos son análogos, por su composición y sus propiedades, a las gomas, dan con el agua disoluciones viscosas o se hinchan en ellas para formar una pseudo-disolución gelatinosa. Se encuentran en las algas, semillas de lino (linaza), semillas de chía, en raíces de malva, membrillo, liquen, nopal, aloe en ciertos hongos y en muchos otros vegetales. Proceden de las degradaciones de la celulosa, calosa, lignina y de las materias pépticas.

**Figura 2.10. Mucílago de chía**



Fuente: C. Manchegos, 2020

- Fécula. El almidón, o fécula, es una macromolécula que está compuesta por dos polímeros distintos de glucosa: la amilosa (en proporción del 25%) y la amilopectina (75%). Es el glúcido de reserva de la mayoría de los vegetales. Gran parte de las propiedades de la harina y de los productos de panadería y repostería pueden explicarse conociendo las características del almidón.
- Aceite. La palabra aceite (del árabe hispánico azzáyt, este del árabe clásico azzayt, y este del arameo zaytā), óleo u olio, es un término genérico para designar numerosos líquidos grasos de orígenes diversos



que no se disuelven en el agua y que tienen menor densidad que esta. Es sinónimo de óleo (del latín óleum), pero este término actualmente se emplea solamente para los sacramentos de la Iglesia católica y en el arte de la pintura. Originalmente, la palabra aceite se refería únicamente al aceite de oliva, y óleo se utilizaba para los demás, pero la palabra se generalizó para denominar a aceites vegetales, animales o minerales sustituyendo a óleo en la mayoría de sus acepciones.

(Blog salud MAPFRE, 2019).

### **2.10.2. Cultivo**

Prefiere suelos ligeros a medios, bien drenados, no demasiado húmedos; como la mayoría de las salvias, es tolerante a la acidez y a la sequía, pero no soporta las heladas. Requiere abundante sol, y no fructifica en la sombra. (Blog salud MAPFRE, 2019).

### **2.10.3. Propiedades.**

La semilla de chía contiene muchos nutrientes como: proteínas, calcio, boro (mineral que ayuda a fijar el calcio de los huesos), potasio, hierro, ácidos grasos como omega 3, antioxidantes y también oligoelementos tales como el magnesio, manganeso, cobre, zinc y vitaminas como el niacina entre otras.

La semilla contiene alrededor de 40% de carbohidratos; de estos, 30% es fibra insoluble, 3% es fibra soluble y el resto son almidones esenciales.

En comparación con otros alimentos tiene dos veces más proteínas que cualquier semilla, cinco veces más calcio que la leche entera, dos veces la cantidad de potasio en los plátanos, tres veces más antioxidantes que los arándanos, tres veces más hierro que las espinacas y siete veces más omega 3 que el salmón.

(Blog salud MAPFRE, 2019).

#### **2.10.4. Uso**

No necesitan molienda para ser consumidas, pudiéndose añadir a batidos, espolvorearlos sobre ensaladas, sopas, cereales, avena, o yogur, y mezclarlos en prácticamente cualquier receta de cocción.

Las semillas remojadas en agua liberan el mucílago, produciendo un líquido gelatinoso prácticamente insípido; en México se saboriza con jugos vegetales o esencias y se consume como bebida refrescante. Las semillas también pueden secarse y molerse para preparar una harina fina y de sabor intenso, llamada pinole, que se consume principalmente como dulce.

Los brotes tiernos se consumen como verdura cruda o cocida y pueden ser usados en ensaladas. (Blog salud MAPFRE, 2019).

#### **2.10.5. Beneficios**

En los últimos años se han realizado numerosos estudios comprobando los diversos beneficios del consumo de chía. Su concentración de fibra soluble hace que absorba una gran cantidad de agua, retrasando la absorción durante la digestión y aumentando la sensación de saciedad, lo que contribuye a una menor ingesta de alimentos, con estudios positivos realizados por la Universidad Autónoma de Yucatán en México o estudios realizados en la facultad de medicina de la Universidad de Ankara, Turquía. (Blog salud MAPFRE, 2019).

#### **2.11. Problemas de perforación en formaciones arcillosas**

Uno de los mayores problemas durante la perforación es el atravesar formaciones de arcilla. Éstas reaccionan en contacto con el agua, dando lugar a la expansión de su estructura y consecuentemente provocando un hinchamiento de las mismas. Cuando las arcillas se hinchan, el diámetro del hueco perforado disminuye y las paredes del hueco se desmoronan provocando graves complicaciones durante la perforación. Por esta razón, se ha tratado de implementar un lodo que pueda minimizar las reacciones de las arcillas cuando estas tienen contacto con el agua, inhibiéndolas.

Después de largos estudios sobre la química de las arcillas se llegó a la conclusión que se puede evitar el hinchamiento de estas utilizando sus propias características. La propiedad más importante para inhibir arcillas es la: "Propiedad de Intercambio Catiónico"; la cual consiste en intercambiar un catión de mayor radio iónico por un catión de menor radio iónico. Cuando ocurra este intercambio en la estructura de las arcillas, se logrará minimizar el hinchamiento. El catión de intercambio que se va a analizar en este estudio es el Potasio (K). (YPFB ANDINA S.A. 2016)

**Figura 2.11. Arcillas, rocas reservorio y daño de formación**



Fuente: Ingeoexpert

## **2.12. Formaciones arcillosas del Boomerang Hills**

### **2.12.1. Formación Yecua**

Pertenece al terciario Neógeno, litológicamente está compuesta por una intercalación de arenas de grano suelto de cuarzo de color hialino de regular selección, con bancos de distinto espesor de arcillitas de color marrón rojizas a violáceas, ocasionalmente gris blanquecinas. Sublaminar, laminar, subplanar. (YPFB ANDINA S.A., 2016)

### **2.12.2. Formación Cajones**

Areniscas gris blanquecinas, gris verdoso, grano fino a medio, menor grueso, cuarzo cristalino, lechoso, sub-redondeado a redondeado, buena selección,

friable, fluorescencia directa parcial, ocre apagado. Recuperada mayormente como grano suelto de cuarzo, que intercala con algunos niveles de limolita gris verdosa, menor marrón rojizo moderado, tabular, sub bloque, compacta, grada a arenisca fina. Y arcillita marrón rojizo moderado, blanda, plástica, masiva, amorfa. Presenta algunos niveles de caliza blanquecina rosácea, de aspecto terroso, blanda. (YPFB ANDINA S.A., 2016)

### **2.12.3. Formación Petaca**

Perteneciente al terciario Paleógeno, litológicamente es una secuencia de intercalaciones de arcillita marrón rojiza oscura que grada a verdosa, sublaminar, laminar, subplanar y niveles de areniscas gris blanquecinas, cuarzo hialino, de grano muy fino a fino, de regular a buena selección, cemento calcáreo.

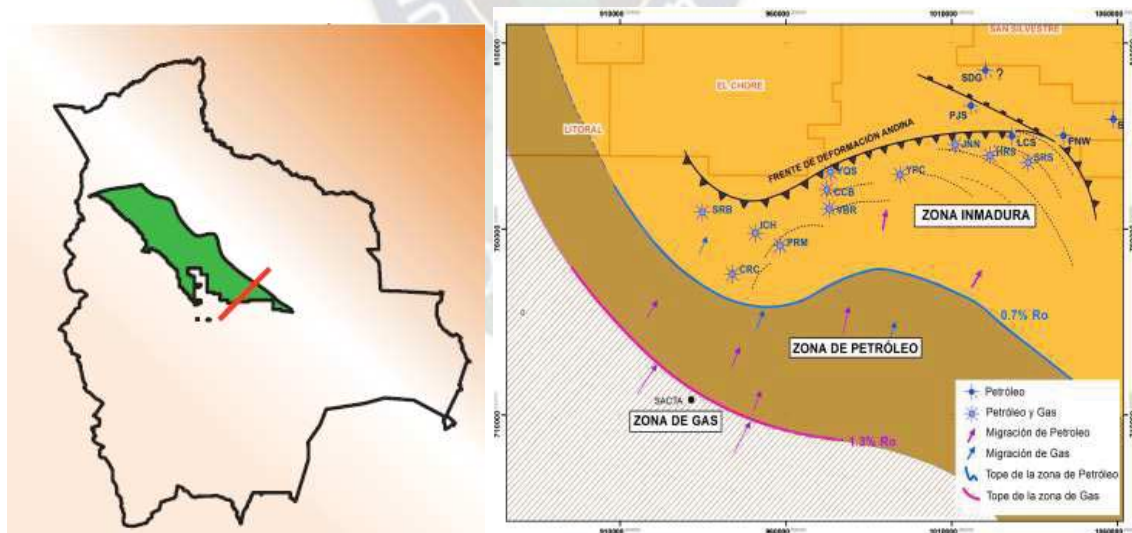
Está conformada por arenisca gris blanquecina, escaso gris verdoso, grano fino-muy fino, con cuarzo cristalino, lechoso, sub redondeado - redondeado, friable, regular a buena selección, cemento calcáreo. Intercalado con limolita gris verdosa a marrón rojizo oscuro, tabular, sub bloque, compacta, grada a arenisca muy fina y arcillita marrón rojizo a gris verdosa, blanda, plástica, masiva, amorfa, moderado, violácea, blanda, plástica, masiva, amorfa, tipo marga. (YPFB ANDINA S.A., 2016)

## CAPÍTULO 3. APLICACIÓN PRÁCTICA EXPERIMENTAL

### 3.1. Antecedentes y características del Boomerang Hill.

Los Boomerang Hills son una región rica en hidrocarburos ubicada frente a los Andes bolivianos, en el centro de Sudamérica, donde la cadena andina se dobla para formar el Oroclino boliviano. La interpretación de líneas sísmicas permite la definición de dos dominios estructurales diferentes con límites definidos aproximadamente por un desprendimiento regional basal. El dominio sur incluye la parte frontal enterrada de los Andes donde predominan las estructuras contractivas de piel delgada de la edad andina (Cenozoico tardío), mientras que el dominio norte pertenece a la Llanura del Beni-Chaco, donde las estructuras contractivas están casi ausentes y la tectónica extensional de piel gruesa predominan los de edad preandina (Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico temprano). Se restauró cinemáticamente una sección transversal, además de descompactarla, para descifrar la evolución de esta región a través del tiempo. (Science Direct, 2022)

Figura 3.1. Área de Boomerang Hills en Bolivia



Fuente: YPFB Andina, 2016

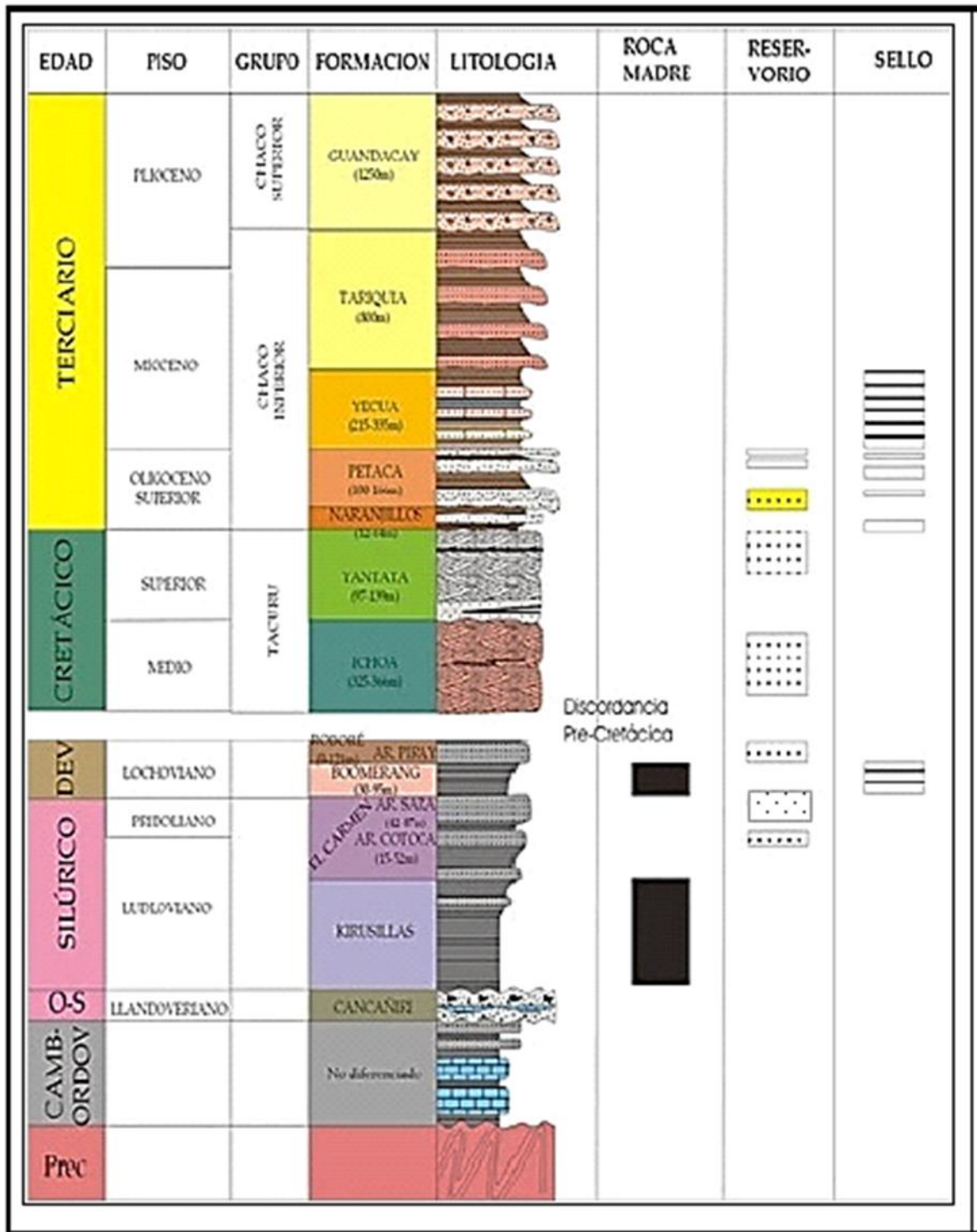
La Figura 3.1. muestra que los pozos productores están en la zona inmadura, por lo tanto, el petróleo viene de las partes profundas de la cuenca del subandino.

Según la Figura 3.2. publicada por la ANH se necesita pasar por las siguientes formaciones: Guandacay, Tariquia, Yecua, Petaca, Naranjillos y Yantata.

La formación Guandacay está compuesta por conglomerados, areniscas y un horizonte tobáceo; las formaciones Petaca, Yecua y Tariquia están constituidas por areniscas, calizas y arcillas, y la formación Yantata está constituido por areniscas de edad Cretácica (Montes Ismael, Geología de Bolivia, 2009)

- Los conglomerados se forman por la consolidación y litificación de gravas.
- Las areniscas con abundancia de feldespatos en la corteza terrestre hacen que las arcillas sean productos de la meteorización muy abundantes. Alrededor del 40% de los minerales de las rocas sedimentarias son arcillas que son minerales dominantes en las rocas sedimentarias más comunes.
- La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo.
- La arcilla es una roca sedimentaria compuesta por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito.

Figura 3.2. Columna estratigráfica general del Boomerang Hills.



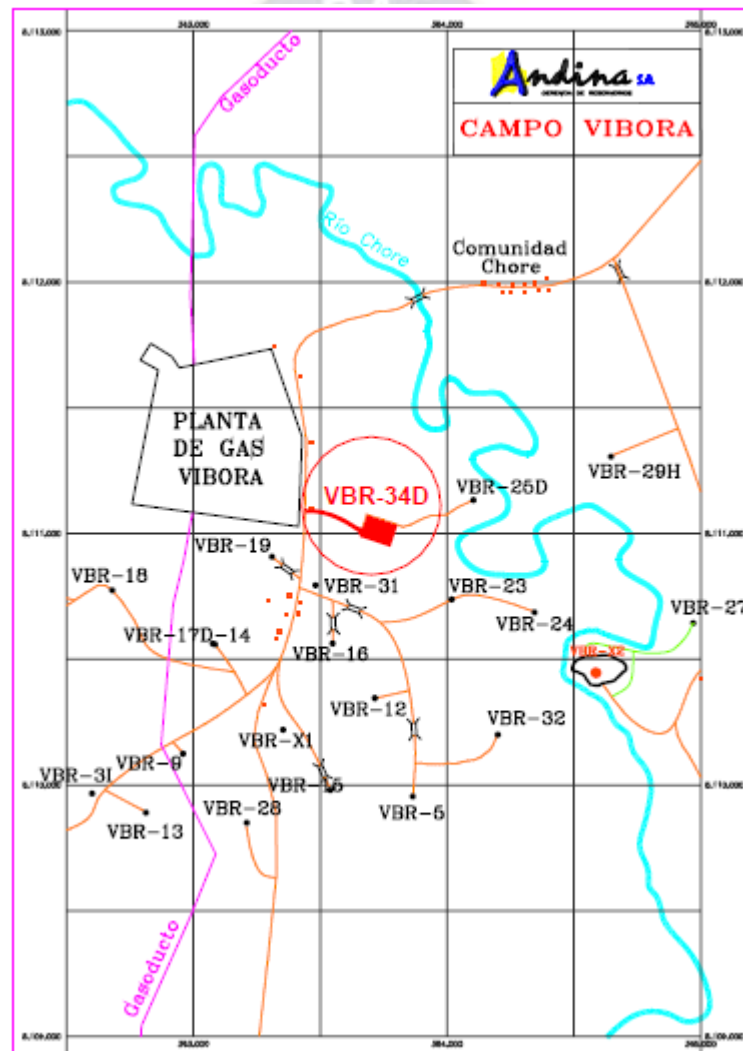
Fuente: ANH, diciembre 2021

Para determinar las características del lodo a llegar se analizarán los Programas de Perforación de tres pozos en tres campos distintos del Boomerang Hills como ser:

### 3.1.1. Pozo VBR - 34D

Es un pozo en desarrollo con una profundidad vertical verdadera de 3700m, su ubicación se muestra en la Figura 3.3.

Figura 3.3. Mapa de ubicación de la locación VBR – 34D

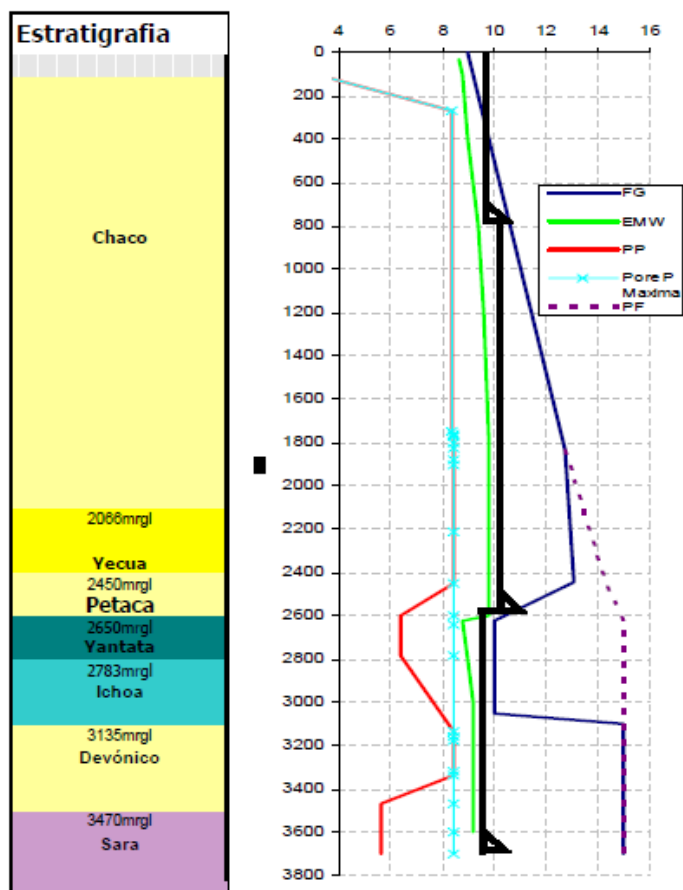


Fuente: YPFB ANDINA, septiembre 2008



En la Figura 3.4 se muestra su estratigrafía y en la Tabla 3.1. el tramo de las formaciones arcillosas.

**Figura 3.4. Esquema de pozo de VBR – 34D**



Fuente: YPFB ANDINA, septiembre 2008

**Tabla 3.1. Intervalos para programa de fluidos de perforación**

N°	FINAL DE SECCION (m)	Observaciones
1	800	-
2A	1800	-
2B	2650	Las formaciones Yecua y Petaca se encuentran en este tramo
3	3700	-

Fuente: YPFB ANDINA, septiembre 2008

La Tabla 3.2 muestra los requerimientos por YPFB que debe tener un lodo de perforación incluyendo el volumen necesario.

**Tabla 3.2. Propiedades recomendadas para el fluido en VBR – 34D**

TRAMO	FINAL DE SECCION (m)	Densidad (lpg)	YP (L/100ft <sup>2</sup> )	VP (cP)	F. API (cc/30mn)	pH	Vol. (bbl)
2B	2650	9.6 – 9.8	20 – 25	12 – 15	<8	10 - 11	1754

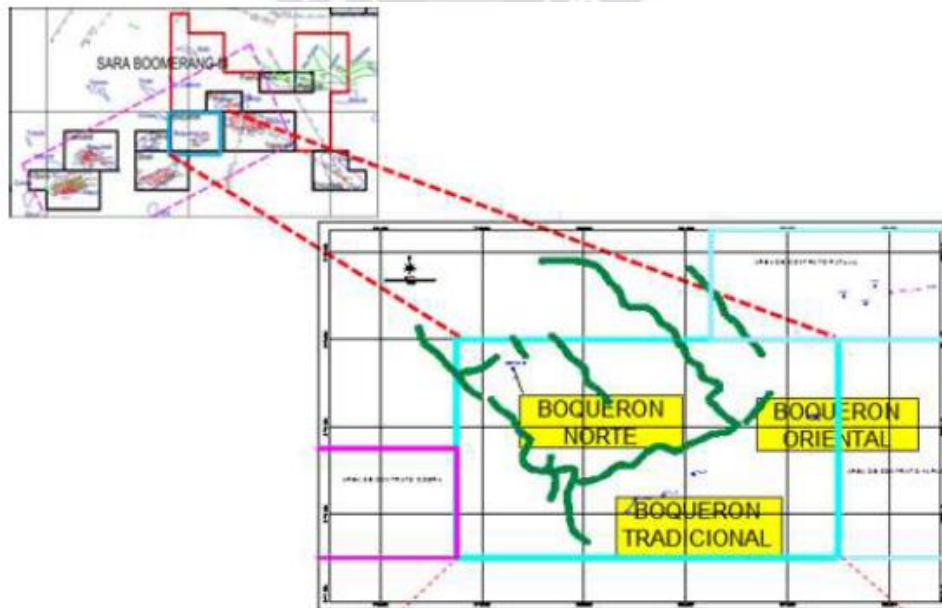
Fuente: YPFB ANDINA, septiembre 2008

### 3.1.2. Pozo BQN - NX3

Es un pozo exploratorio en Boquerón norte con una profundidad vertical verdadera de 3150m, en la figura 3.5 se muestra su ubicación.

El campo Boquerón se encuentra ubicado en la Provincia Ichilo del Departamento de Santa Cruz, 260 km por carretera al NW de la capital. Fisiográficamente esta zona corresponde a la Llanura Chaco-Beniana Central, entre los ríos Yapacaní é Ichilo, en el extremo Occidental del lineamiento conocido como Boomerang Hills. (YPFB ANDINA, mayo 2016)

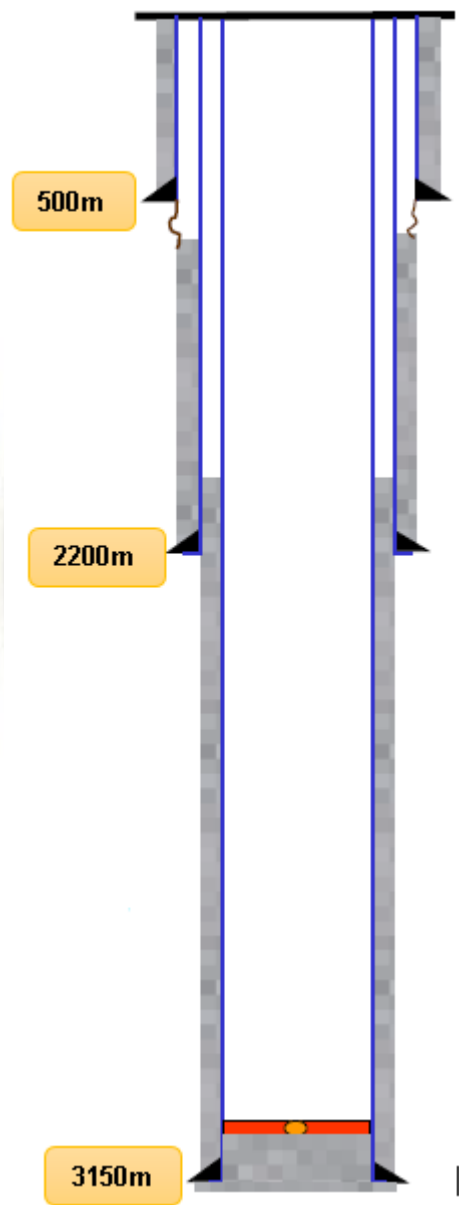
**Figura 3.5. Mapa de ubicación de la locación BQN - NX3**



Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

En la Figura 3.6., Tabla 3.3. y Tabla 3.4. muestran la profundidad del tramo que tiene formaciones arcillosas que son Petaca y Cajones.

**Figura 3.6. Esquema de pozo de BQN - NX3**



Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

**Tabla 3.3. Secuencia estratigráfica**

SISTEMA	FORMACION	RESERVORIO	PROGNOSIS BQN-N X3	
			TVD (m)	m.s.n.m.
TERCIARIO	Petaca	Petaca	2222	-1987
CRETACICO	Cajones	Cajones	2332	-2097
	Yantata	Yantata	2362	-2127
	Ichoa		2472	-2237
DEVONICO	Roboré		2852	-2617
SILURICO	El Carmen	Sara	2995	-2760
Profundidad Final			3150	-2915

Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

**Tabla 3.4. Intervalos para programa de fluidos de perforación**

N°	FINAL DE SECCION (m)	Observaciones
1	500	-
2	2200	-
3	3150	Las formaciones Petaca y Cajones se encuentran en este tramo

Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

Se usó el sistema de fluido KLA SHIELD que tiene las siguientes características de la Tabla 3.5. que llegan a ser requisitos para la elaboración de este proyecto que son similares al análisis del anterior pozo.

**Tabla 3.5. Propiedades recomendadas para el fluido en BQN - NX3**

TRAMO	FINAL DE SECCION (m)	Densidad (lpg)	YP (L/100ft <sup>2</sup> )	VP (cP)	F. API (cc/30mn)	pH	Vol. (bbl)
3	3150	9.5 – 10	25 – 40	25 – 30	5 - 7	9.5 - 11	2700

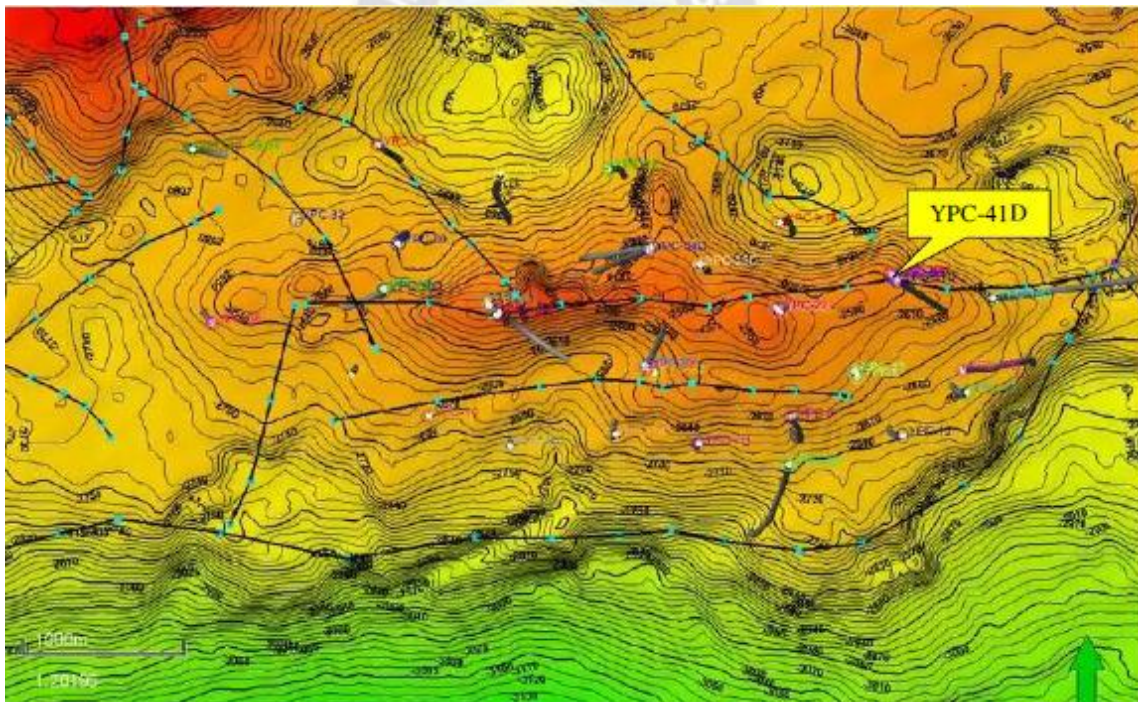
Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

### 3.1.3. Pozo YPC - 41D

Es un pozo en desarrollo con una profundidad vertical verdadera de 3000m.

El campo Yapacaní está ubicado en la Provincia Ichilo del Departamento de Santa Cruz, sobre la margen izquierda del río Yapacaní en la Llanura Central. Situado en el lineamiento estructural conocido como el Boomerang Hills mostrado en la Figura 3.7. La estratigrafía del campo Yapacaní es conocida en base a la abundante información de subsuelo, proveniente de los pozos exploratorios, de avanzada y de desarrollo perforados en la estructura. (YPFB ANDINA, junio 2017)

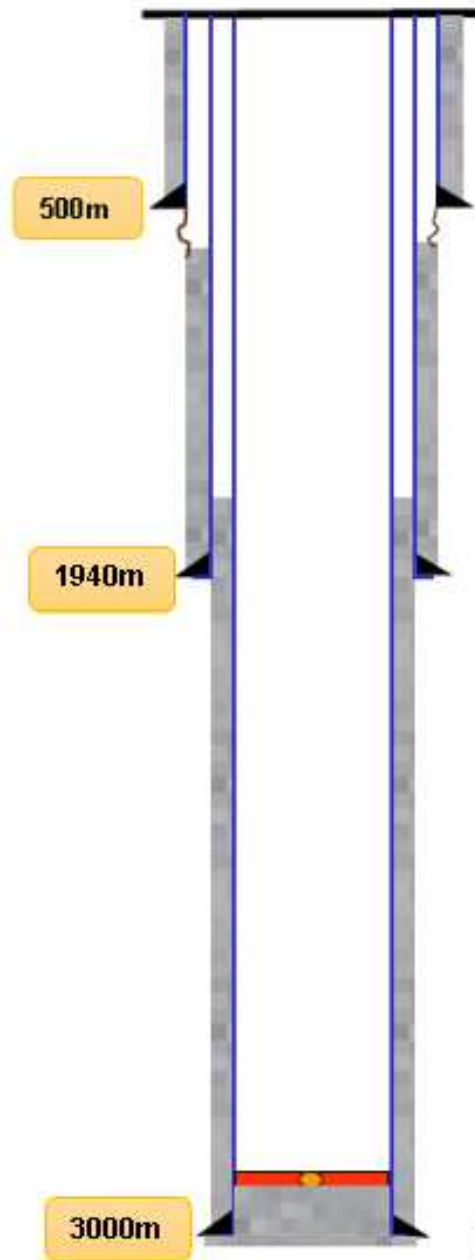
**Figura 3.7. Ubicación del pozo YPC – 41D en el mapa estructural**



Fuente: YPFB ANDINA, junio 2017

A continuación, en la Figura 3.8., Tabla 3.6 y Tabla 3.7. se muestra la profundidad de cada uno de los tramos indicando que en el segundo es donde se encuentra las formaciones arcillosas como Yecua y Petaca.

Figura 3.8. Esquema de pozo de YPC – 41D



Fuente: YPFB ANDINA, junio 2017

**Tabla 3.6. Secuencia estratigráfica del YPC – 41D**

SISTEMA	FORMACION	RESERVORIO	PROGNOSIS YPC- 41D		
			MD (m)	TVD (m)	m.s.n.m
NEÓGENO	Grupo Chaco		-	-	-
	Yecua		1531.06	1531.0	-1286.0
TERCIARIO	Petaca	Petaca	1789.72	1785.0	-1540.0
CRETACICO	Yantata	Yantata Sup.	1934.65	1925.0	-1680.0
	Ichoa		2054.75	2041.0	-1796.0
DEVONICO	Limoncito		2483.35	2455.0	-2210.0
		Arenisca 1	2555.82	2525.0	-2280.0
	Roboré	Arenisca 2	2623.11	2590.0	-2345.0
		Ayacucho	2659.35	2625.0	-2380.0
SILURICO	El Carmen	Sara	2918.17	2875.0	-2630,0
<b>Profundidad Final</b>			<b>3047.57</b>	<b>3000.0</b>	<b>-2755.0</b>

Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

**Tabla 3.7. Intervalos para programa de fluidos de perforación**

N°	FINAL DE SECCION (m)	Observaciones
1	500	-
2	1940	Las formaciones Yecua y Petaca se encuentran en este tramo
3	3000	

Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

Se usó el sistema de fluido KLA SHIELD, donde en la Tabla 3.8 muestra las características del lodo que son similares a los anteriores pozos evaluados, llegando a ser parámetros requisitos para la elaboración del nuevo lodo a partir de la chía.

**Tabla 3.8. Propiedades recomendadas para el fluido en YPC – 41D**

TRAMO	FINAL DE SECCION (m)	Densidad (lpg)	YP (L/100ft <sup>2</sup> )	VP (cP)	F. API (cc/30mn)	pH	Vol. (bbl)
2	1940	9.6 – 9.8	20 – 40	15 – 25	< 7	9.5 - 10	1700

Fuente: YPFB ANDINA, mayo 2016

### 3.1.4. Requisitos del lodo en formaciones arcillosas del Boomerang Hills

En la Tabla 3.9. se unificó las características de los tres pozos de distintos campos en el área del Boomerang Hills, donde se puede notar la similitud de los distintos parámetros.

**Tabla 3.9. Propiedades de los fluidos en los tres campos**

POZO	FINAL DE SECCION (m)	Densidad (lpg)	YP (L/100ft <sup>2</sup> )	VP (cP)	F. API (cc/30mn)	pH	Vol. (bbl)
VBR – 34D	2650	9.6 – 9.8	20 – 25	12 – 15	< 8	10 - 11	1754
BQN - NX3	3150	9.5 – 10	25 – 40	25 – 30	5 - 7	9.5 - 11	2700
YPC – 41D	1940	9.6 – 9.8	20 – 40	15 – 25	< 7	9.5 - 10	1700

Fuente: Elaboración propia

Considerando que los valores de los tres pozos en distintos sectores del Boomerang Hills son similares, se tomó en cuenta la media aritmética de cada propiedad a cumplir para la formulación del fluido presentada en la Tabla 3.10:

**Tabla 3.10. Requisitos de calidad que debe tener el fluido a formular**

Densidad (lpg)	YP (L/100ft <sup>2</sup> )	VP (cP)	F. API (cc/30min)	pH
9.5 – 10	20 – 40	15 – 30	5 - 7	9.5 - 11

Fuente: Elaboración propia

Para los siguientes cálculos se consideró **9.7 lpg** de densidad.

### 3.2. Chía para la formulación de lodos

La semilla de chía tiene un muy alto contenido de fibra que no puede ser atacada por las enzimas digestivas; por lo tanto, y para aprovechar al máximo los nutrientes de la semilla, es mejor consumirla molida. (Moreu Burgos, 2019)

Un análisis en la universidad de Ecuador realizó dos pruebas con dos lotes de chía para descubrir qué prueba resultaba como el mejor mucílago una se realizó con el grano de chía entero y otro con chía molida, donde el mucílago con chía molida fue seleccionada debido a que después de pasar por la hidratación con agua mantuvo sus propiedades gelificantes, no se vió afectada por hongos a largo plazo y resultó una consistencia de mucílago más firme que el mucílago proveniente de la hidratación de granos enteros. (Bedoya Grace, 2018)



Considerando las dos versiones anteriores, para la formulación **se utilizó chía molida de forma directa**, para evitar gastos en maquinaria de extracción de mucílago como por ejemplo una maquinaria de centrifugado, donde se consideraría otros factores como el tiempo, o el orden en el diagrama de flujo para que la chía molida sea absorbido en su totalidad.

### **3.3. Diseño experimental**

Estudio donde se manipulan una o más variables independientes VI (causas), para analizar los efectos sobre las variables dependientes VD (consecuencias), donde el grupo experimental es quien recibe el tratamiento y el grupo de control no.

#### **3.3.1. Plan experimental**

Primeramente, el docente especializado en Fluidos de perforación encargado de los equipos disponibles en el laboratorio de Fluidos de Perforación de los predios de Cota Cota me capacitó para el manejo de equipos tanto para la elaboración como para los que miden parámetros imprescindibles, también se realizó una inspección y adquisición de los aditivos mostrados en el ANEXO A.

Se inició realizando pruebas con el valor de la densidad medido en agua, en caso de que no resulte la formulación se realizará pruebas con la densidad medido en aceite.

Cada una de las pruebas tiene sus respectivos cálculos y los diagramas de flujo del procedimiento que se presentan en el ANEXO C con el fin de encontrar el mejor camino para obtener un lodo de perforación homogéneo, libre de masas considerables en suspensión ya que se trabajará con polímeros.

#### **3.3.2. Operacionalización de variables**

En base a un análisis de cambios que pueden afectar las propiedades del lodo se consideraron las variables descritas en la Tabla 3.11, donde en la Tabla 3.12 se menciona sus dimensiones:

**Tabla 3.11. Variables dependientes e independientes**

<b>VI (CAUSAS)</b>	<b>VD (CONSECUENCIAS)</b>
<i>Densidad de Chía</i>	<i>Densidad del lodo</i>
<i>Concentración de Chía</i>	<i>Viscosidad plástica</i>
<i>Concentración de Chía</i>	<i>Yield Point</i>
<i>Orden de flujograma</i>	<i>Estabilidad</i>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.12. Dimensiones e indicadores**

<b>N°</b>	<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Tipo de variable</b>
1	Densidad de Chía	Masa / vol.	Peso/Cantidad	Continua
2	Concentración de chía	Masa / vol.	Peso	Continua
3	Orden de flujograma	Física	Secuencia de pasos	Ordinal
4	Densidad del lodo	Masa / vol.	Peso/Cantidad	Continua
5	Viscosidad plástica	cP	Viscosidad	Continua
6	Yield point	L/100ft <sup>2</sup>	Cantidad/área	Continua
7	Estabilidad	Física	API	Ordinal

### **3.4. Determinación de las densidades reales de los aditivos**

Para empezar a realizar las pruebas en laboratorio se consideró asemejarnos al sistema KLA-SHIELD, con los aditivos disponibles en la ciudad de La Paz, para lo cual se realizará pruebas para saber las densidades reales de cada uno de los aditivos que conformarán el lodo, debido a distintos valores de densidad en páginas web oficiales que varían de acuerdo a su concentración.

Para ello se tomó en cuenta los siguientes aditivos:

**Tabla 3.13. Aditivos para la formulación del lodo**

<b>N°</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Función</b>
1	Hidróxido de potasio (KOH)	Controlador de pH; fuente de K
2	Cloruro de potasio (KCl)	Inhibidor de hidratación
3	Bentonita	Viscosificante; controlador de filtrado
4	Goma xantana (GX)	Viscosificante
5	Carboximetilcelulosa (CMC)	Controlador de filtrado
6	Barita	Densificante
7	Agua	Base

Fuente: Elaboración propia

Según distintas bibliografías las densidades del KOH pueden ser 2.12 g/cm<sup>3</sup> o 2.04 g/cm<sup>3</sup> y del CMC pueden ser 1.6 g/cm<sup>3</sup> o 1.8 g/cm<sup>3</sup>, de los demás aditivos sus datos de densidad son únicos (Merck &Co,2016).

Para la formulación de un lodo de perforación por el método de Balance de materia se requiere las densidades de los aditivos y el valor de las concentraciones sugeridas por el docente experto en el área, que son las siguientes:

**Tabla 3.14. Concentraciones y densidades de los aditivos**

<b>N°</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Concentración (lb/bbl)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	Hidróxido de potasio (KOH)	1	2.12 v 2.04
2	Cloruro de potasio (KCl)	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	Goma xantana (GX)	1	1.5
5	Carboximetilcelulosa (CMC)	1	1.6 v 1.8
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

Según el manual de fluidos de perforación API el volumen de todas las pruebas en laboratorio debe ser 350ml que representan 1 bbl de lodo en campo. La base (agua) es el aditivo que tendrá mayor concentración, pero debe ser calculada

Se usarán las siguientes ecuaciones por la teoría de conservación de la materia de masas:

$$m_f = \sum m_i$$

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f} \rightarrow m_f = \rho_f * V_f$$

$$\rho_f * V_f = \sum \rho_i * V_i$$

$$\rho_f * V_f = \rho_1 * V_1 + \rho_2 * V_2 + \rho_3 * V_3 + \dots + \rho_n * V_n \quad (5)$$

Donde:

$m_f$  = Masa total del fluido

$\rho_f$  = Densidad del fluido

$V_f$  = Volumen total del fluido

$m_i$  = Masa de un aditivo

$\rho_i$  = Densidad de un aditivo

$V_i$  = Volumen de un aditivo

$C_i$  = Concentración de un aditivo

También cumple con la conservación de materia en volumen:

$$V_f = \sum V_i$$

$$V_f = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (6)$$

Ecuaciones para la concentración:

$$m_i = C_i * V_f$$

$$\rho_i * V_i = C_i * V_f \quad \rightarrow \quad V_i = \frac{C_i * V_f}{\rho_i}$$

Unidades del SI para volumen es bbl y gal (1 bbl = 42 gal)

Factores de conversión del SI al CGS:

$$C_i = \frac{1 \text{ lb}}{\text{bbl}} * \frac{543.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} * \frac{1 \text{ Bbl}}{159 \text{ l}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = \frac{1 \text{ lb}}{\text{bbl}}$$

Para hallar la masa de cualquier aditivo a partir de su concentración tomando en cuenta un volumen de 350 ml, el resultado de masa llega a ser la misma que la concentración:

$$C_i = \frac{X \text{ lb}}{\text{bbl}} * \frac{0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}{\frac{1 \text{ lb}}{\text{bbl}}} * 350 \text{ ml} = X \text{ g}$$

$$C_i \left( \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \right) = m_i(\text{g}) \quad (7)$$

Lo que queda demostrado que para un volumen total de fluido de perforación de 350 ml la  $C_i$  (lb/bbl) será igual a la masa en gramos, que es ésa la razón matemática principal donde el Manual de Fluidos de Perforación de API indica que un fluido de 350 ml representa en concentración a 1 bbl de un fluido de perforación:

$$1 \text{ bbl}_{\text{Fluido de perforacion}} \equiv 350 \text{ ml}_{\text{Fluido de perforacion}}$$

**Es por esa razón es que se realizaron los cálculos y las pruebas en laboratorio para 350 ml del fluido de perforación.**

Factores de conversión de sistema CGS al Sistema Ingles para la densidad a partir de la GE:

$$GE = \frac{1 \text{ g}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ lb}}{453.6 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} * \frac{3.785 \text{ l}}{1 \text{ gal}} = 8.33 \frac{\text{lb}}{\text{gal}}$$

$$\frac{Y \text{ g}}{\text{ml}} * 8.33 = \frac{Z \text{ lb}}{\text{gal}}$$

Para determinar cuáles son las densidades verdaderas de KOH y CMC se hicieron cálculos de 350 ml para un lodo de 9.7 lpg teórico intercalando cada una que llegaron a ser cuatro pruebas necesarias, de las cuales se eligió los valores de la prueba que experimentalmente sea 9.7 lpg en la balanza de lodo.

### 3.4.1. Primera determinación

Para la elaboración del lodo de perforación se usó una balanza y un mixer que se muestran en el ANEXO B. Luego ya que se observaron masas considerables no disueltas en el producto final se decidió realizar pruebas con distinto orden de flujograma donde el último llegó a ser satisfactorio por sus características homogéneas representadas en el ANEXO C.

Para la realización de esta primera prueba se consideraron los siguientes valores:

**Tabla 3.15. Valores para la primera determinación**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	GX	1	1.5
5	CMC	1	1.8
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}} = 0.472 \text{ ml}$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{GX} = \frac{1 \text{ g}}{1.5 \text{ g/ml}} = 0.67 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{GX} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.67 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 338.915 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{GX} * V_{GX} + \rho_{CMC} * V_{CMC} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{GX} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + [4.2 * (338.9 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$383.7 = 1423.38 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1039.68$$

$$V_{H_2O} = 324.92 \text{ ml}$$

$$V_{\text{Barita}} = 338.915 - 324.92 = 14 \text{ ml}$$

**Tabla 3.16. Cálculo de masas primera determinación**

Nº	Aditivo	$V \text{ (ml)} * \rho \text{ (g/ml)}$	masa (g)
1	KOH	$0.472 * 2.12$	1
2	KCl	$5.05 * 1.98$	10
3	Bentonita	$4.35 * 2.3$	10
4	GX	$0.67 * 1.5$	1
5	CMC	$0.56 * 1.8$	1
6	Barita	$14 * 4.2$	58.8
7	Agua	$324.9 * 1$	324.92

Fuente: Elaboración propia

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.5 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} = 9.65 \text{ lpg}$$

### 3.4.2. Segunda determinación

Se consideraron los siguientes valores, intercalando:

**Tabla 3.17. Valores para la segunda determinación**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.04
2	KCl	10	1.98
3	Bentonita	10	2.3
4	GX	1	1.5
5	CMC	1	1.6
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia



$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.04 g/ml} = 0.49 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{GX} = \frac{1 g}{1.5 g/ml} = 0.67 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.6 g/ml} = 0.625 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{GX} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.49 + 5.033 + 4.35 + 0.67 + 0.625 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 338.832 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{GX} * V_{GX} + \rho_{CMC} * V_{CMC} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{GX} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + [4.2 * (338.832 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$383.7 = 1423.094 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1039.39$$

$$V_{H_2O} = 324.81 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 338.832 - 324.81 = 14.022 \text{ ml}$$

**Tabla 3.18. Cálculo de masas segunda determinación**

<i>N°</i>	<i>Aditivo</i>	<i>V (ml) * ρ(g/ml)</i>	<i>masa (g)</i>
1	<i>KOH</i>	<i>0.49 * 2.04</i>	<i>1</i>
2	<i>KCl</i>	<i>5.05 * 1.98</i>	<i>10</i>
3	<i>Bentonita</i>	<i>4.35 * 2.3</i>	<i>10</i>
4	<i>GX</i>	<i>0.67 * 1.5</i>	<i>1</i>
5	<i>CMC</i>	<i>0.625 * 1.6</i>	<i>1</i>
6	<i>Barita</i>	<i>14.022 * 4.2</i>	<i>58.89</i>
7	<i>Agua</i>	<i>324.81 * 1</i>	<i>324.81</i>

Fuente: Elaboración propia

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.35 \frac{lb}{gal} = 9.35 \text{ lpg}$$

### 3.4.3. Tercera determinación

Para la siguiente prueba se consideraron los siguientes valores:

**Tabla 3.19. Valores para la tercera determinación**

N°	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.98
3	Bentonita	10	2.3
4	GX	1	1.5
5	CMC	1	1.6
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{GX} = \frac{1 g}{1.5 g/ml} = 0.67 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.6 \text{ g/ml}} = 0.625 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{GX} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.67 + 0.625 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 338.85 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{GX} * V_{GX} + \rho_{CMC} * V_{CMC} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{GX} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + [4.2 * (338.85 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$383.7 = 1423.17 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1039.47$$

$$V_{H_2O} = 324.83 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 338.85 - 324.83 = 14.02 \text{ ml}$$

**Tabla 3.20. Cálculo de masas tercera determinación**

N°	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.98	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	GX	0.67 * 1.5	1
5	CMC	0.625 * 1.6	1
6	Barita	14.022 * 4.2	58.89
7	Agua	324.81 * 1	324.81

Fuente: Elaboración propia

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.5 \frac{lb}{gal} = 9.5 \text{ lpg}$$

### 3.4.4. Cuarta determinación

Para la cuarta determinación se usaron los siguientes valores:

**Tabla 3.21. Valores para la cuarta determinación**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.04
2	KCl	10	1.98
3	Bentonita	10	2.3
4	GX	1	1.5
5	CMC	1	1.8
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f = 350 \text{ ml}$

$d_f = 9.7 \text{ lpg} = 9.7 \text{ lb/gal}$  (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.04 g/ml} = 0.49 \text{ ml}$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{GX} = \frac{1 \text{ g}}{1.5 \text{ g/ml}} = 0.67 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{GX} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.49 + 5.033 + 4.35 + 0.67 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 338.9 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{GX} * V_{GX} + \rho_{CMC} * V_{CMC} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{GX} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + [4.2 * (338.9 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$383.7 = 1423.38 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1039.68$$

$$V_{H_2O} = 324.9 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 338.9 - 324.9 = 14 \text{ ml}$$

**Tabla 3.22. Cálculo de masas cuarta determinación**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>V (ml) * ρ(g/ml)</i>	<i>masa (g)</i>
1	<i>KOH</i>	<i>0.472 * 2.04</i>	<i>1</i>
2	<i>KCl</i>	<i>5.05 * 1.98</i>	<i>10</i>
3	<i>Bentonita</i>	<i>4.35 * 2.3</i>	<i>10</i>
4	<i>GX</i>	<i>0.67 * 1.5</i>	<i>1</i>
5	<i>CMC</i>	<i>0.56 * 1.8</i>	<i>1</i>
6	<i>Barita</i>	<i>14* 4.2</i>	<i>58.8</i>
7	<i>Agua</i>	<i>324.9 * 1</i>	<i>324.9</i>

Fuente: Elaboración propia

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.5 \frac{lb}{gal} = 9.5 \text{ lpg}$$

#### **3.4.5. Densidades oficiales de los aditivos según pruebas**

Primera determinación:  $\rho_f = 9.65 \text{ lpg}$

Segunda determinación:  $\rho_f = 9.35 \text{ lpg}$

Tercera determinación:  $\rho_f = 9.5 \text{ lpg}$

Cuarta determinación:  $\rho_f = 9.5 \text{ lpg}$

Para una densidad teórica de 9.7 lpg los valores de la primera determinación son los elegidos por su aproximación más cercana, que son las siguientes:

**Tabla 3.23. Densidades y concentraciones oficiales de aditivos**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	<i>KOH</i>	1	2.12
2	<i>KCl</i>	10	1.987
3	<i>Bentonita</i>	10	2.3
4	<i>GX</i>	1	1.5
5	<i>CMC</i>	1	1.8
6	<i>Barita</i>	-	4.2
7	<i>Agua</i>	-	1

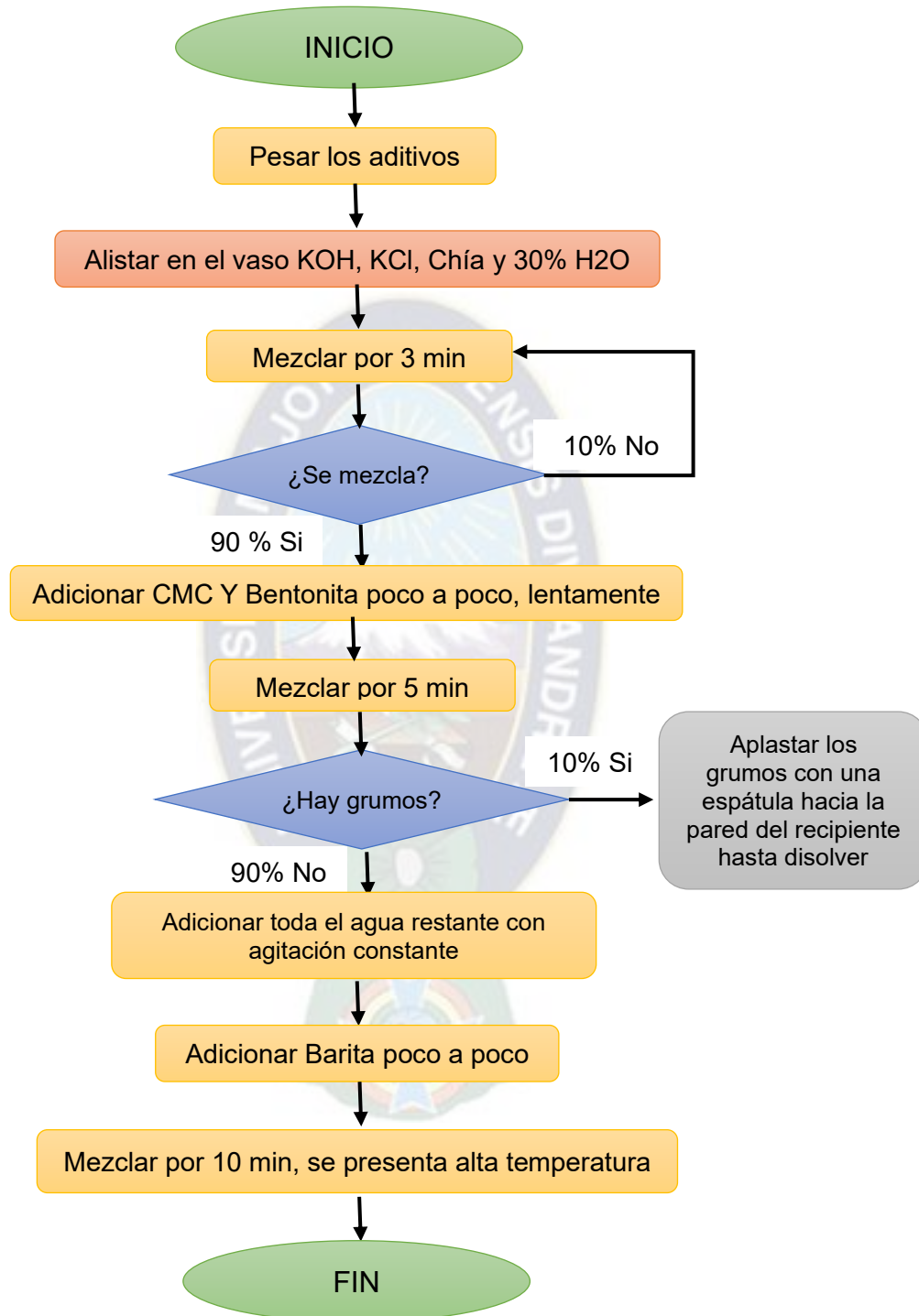
### **3.5. Diagrama del proceso del fluido de perforación a partir de chía**

Para que el fluido de perforación tenga una consistencia homogénea, libre de grumos, libre de sólidos en suspensión y aditivos precipitados, se requirió realizar pequeñas pruebas presentadas en el Anexo C, ya que se observó que hubo masas de chía sin disolver, como también de polímeros que al añadir de golpe a la mezcla se pulverizaban y se hacían grupos pequeños de masa que no se disolvían ni mezclando a la máxima potencia por más de 10 min que es el tiempo necesario para que una muestra de lodo se forme. También se observó que si previamente se hidrata los polímeros se forma una masa dura que tampoco logra disolverse ni aplastándolo con una espátula.

Es por eso que finalmente se encontró un camino donde el producto final de fluido de perforación sea satisfactorio que en forma de algoritmo llega a ser la siguiente Figura 3.9.:



Figura 3.9. Diagrama del proceso de fluido de perforación a partir de chía



### 3.6. Determinación de densidad de la chía con agua (D1)

Primeramente, se compró 3Kg semillas de chía enteras y se molió en una licuadora por 5 minutos como se muestra en la Figura 3.10.

**Figura 3.10. Molido de granos de chía en licuadora**



Fuente: Elaboración propia

Luego se midió la densidad por el método de la picnometría de forma no convencional, con un frasco de 100 ml y una balanza de gramos digital que se muestra en la Figura 3.11 y Figura 3.12.

**Figura 3.11. Pesado de la chía**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.12. Pesado de chía con agua**



Fuente: Elaboración propia

Prueba 1 por el método de picnometría:

$$m_{\text{frasco}} = 9.77 \text{ g}$$

$$m_{\text{frasco+chía}} = 32.63 \text{ g}$$

$$V_{\text{frasco+chía}} = 40 \text{ ml}$$

$$\rho_{\text{chía}} = \frac{32.63 \text{ g} - 9.77}{40 \text{ ml}} = 0.5715 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Prueba 2 por el método de picnometría:

$$m_{\text{frasco}} = 9.77 \text{ g}$$

$$m_{\text{frasco+chía}} = 39.56 \text{ g}$$

$$V_{\text{frasco+chía}} = 60 \text{ ml}$$

$$\rho_{\text{chía}} = \frac{39.56 \text{ g} - 9.77 \text{ g}}{60 \text{ ml}} = 0.4965 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Calculando la media aritmética:

$$\rho_{\text{CHIA}} = \frac{0.5715 \frac{\text{g}}{\text{ml}} + 0.4965 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}{2} = 0.534 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

La densidad final de la chía medido con agua resulta **0.534 g/ml**.

### 3.7. Primera prueba con D1

En el proyecto de grado de Bedoya en Ecuador del 2018 sugiere usar 35 g de chía para que un lodo cumpla con las propiedades necesarias, pero para realizar la primera prueba se usó una masa considerable de 25 g de Chía para analizar si el mucílago afecta a la reología del lodo.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.24. Valores para la primera prueba**

N°	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	GX	1	1.5
5	CMC	1	1.8
6	CHIA	25	0.534
7	Barita	-	4.2
8	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f = 350 \text{ ml}$

$d_f = 9.7 \text{ lpg} = 9.7 \text{ lb/gal}$  (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} * \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.162 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}} = 0.472 \text{ ml}$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{GX} = \frac{1 \text{ g}}{1.5 \text{ g/ml}} = 0.67 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

$$V_{CHIA} = \frac{25 \text{ g}}{0.534 \text{ g/ml}} = 46.82 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{GX} + V_{CMC} + V_{CHIA} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.67 + 0.56 + 46.82 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 292.08 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{GX} * V_{GX} + \rho_{CMC} * V_{CMC} \\ + \rho_{CHIA} * V_{CHIA} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{GX} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + 25 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + 25 + [4.2 * (292.08 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$358.7 = 1226.736 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 868.036$$

$$V_{H_2O} = 271.26 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 292.08 - 271.26 = 20.82 \text{ ml}$$

**Tabla 3.25. Cálculo de masas para la primera prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	GX	0.67 * 1.5	1
5	CMC	0.56 * 1.8	1
6	CHIA	46.82 * 0.534	25
7	Barita	20.82 * 4.2	87.44
8	Agua	271.26 * 1	271.26

Fuente: Elaboración propia

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 13 \frac{lb}{gal} = 13 \text{ lpg}$$

Se midió también el volumen en Filtro API medido en 30 minutos descrito en el ANEXO F:

**Tabla 3.26. Resultados del filtro API primera prueba**

Tiempo (min)	Volumen (ml)	Tiempo (min)	Volumen (ml)	Tiempo (min)	Volumen (ml)
00:01	0	00:11	1.58	00:21	2.4
00:02	0.2	00:12	1.68	00:22	2.5
00:03	0.55	00:13	1.8	00:23	2.6
00:04	0.55	00:14	1.85	00:24	2.65
00:05	0.7	00:15	1.98	00:25	2.71
00:06	0.9	00:16	2	00:26	2.8
00:07	1.05	00:17	2.1	00:27	2.8
00:08	1.15	00:18	2.15	00:28	2.9
00:09	1.3	00:19	2.2	00:29	2.95
00:10	1.4	00:20	2.4	00:30	2.95

Fuente: Elaboración propia

## ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO

En los requisitos de calidad de la Tabla 3.10. indica que la densidad debe ser 9.7 lpg, pero medido en balanza salió igual a 13 lpg que puede ser debido a la densidad errónea de la chía; el volumen del filtro API debe ir de 5ml a 7ml, la prueba ni llega a los 3 ml; el fluido tiene alta viscosidad comparada con el lodo SIN chía por lo que se decidió eliminar GX, ya que se evidenció que la chía aporta viscosidad al lodo también.

### 3.8. Segunda prueba con D1

Se utilizará los mismos datos de la anterior, omitiendo la Goma Xantana que como factor positivo será menos un gasto en el área de costos, con una masa considerable de 25 g de Chía para analizar la viscosidad.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.27. Valores para la segunda prueba**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	CHIA	25	0.534
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}} = 0.472 \text{ ml}$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

$$V_{CHIA} = \frac{25 \text{ g}}{0.534 \text{ g/ml}} = 46.82 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{CHIA} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + 46.82 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 292.765 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{CHIA} * V_{CHIA} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + m_{CHIA} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 25 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 25 + [4.2 * (292.765 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$359.7 = 1229.613 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 869.913$$

$$V_{H_2O} = 271.85 \text{ ml}$$



$$V_{Barita} = 292.765 - 271.85 = 20.915 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes podemos pasar a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.28. Cálculo de masas para la segunda prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
5	CHIA	46.82 * 0.534	25
6	Barita	20.92 * 4.2	87.86
7	Agua	271.85 * 1	271.85

Fuente: Elaboración propia

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el Anexo D:

$$\rho_f = 12 \frac{lb}{gal} = 12 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.29. Datos con viscosímetro FANN de la segunda prueba**

Velocidad (RPM)	ϑ <sub>1</sub>	ϑ <sub>2</sub>
600	No lee	No lee
300	264	265
200	214	214
100	170	170
6	71	70
3	65	66

Fuente: Elaboración propia

El límite de lectura del equipo es 300 cP, a 600 RPM sobrepasa este valor por el cual no se pudo realizar la lectura, pero tomando en cuenta la diferencia entre las velocidades de 200 y 300 RPM, se estima el valor de 400 cP como lectura a 600 RPM, reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 400 - 265$$

$$Vp = 135 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 265 - 135$$

$$Yp = 130 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

En los requisitos de calidad de la Tabla 3.10. indica que la densidad debe ser 9.7 lpg, pero medido en balanza salió igual a 12 lpg que resulta demasiado alto para el área del Boomerang Hills, donde se observó que a pesar de que el lodo tiene una buena consistencia viscosa disminuyó su densidad medida en balanza de lodo respecto a la primera prueba, es decir que afectó de manera positiva el haber descartado el uso de Goma Xantana.

En la misma tabla también indica que la viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, pero en la prueba claramente los valores rebasaron estos requisitos llegando a ser 135 cP y 130 L/100ft<sup>2</sup>.

### **3.9. Tercera prueba determinación de concentración de chíá**

Para la siguiente prueba se toma en cuenta los cálculos de formulación sin chíá, donde se fué buscando llegar a los parámetros de calidad, principalmente de la reología ya que son los valores más importantes que debe cumplir, aumentando la cantidad de masa de chíá en cada prueba ya que es equivalente a la concentración:

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.30. Valores para la tercera prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f = 350 \text{ ml}$

$d_f = 9.7 \text{ lpg} = 9.7 \text{ lb/gal}$  (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} * \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.162 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}} = 0.472 \text{ ml}$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$384.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1041.557$$

$$V_{H_2O} = 325.5 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 325.5 = 14.1 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se puede pasar a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.31. Cálculo de masas para la tercera prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	14.1 * 4.2	59.22
7	Agua	325.5 * 1	325.5

Fuente: Elaboración propia

Para esta nueva medición se empezó adicionando **3g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.4 \frac{lb}{gal} = 9.4 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el Anexo E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.32. Datos medidos con viscosímetro FANN de la tercera prueba**

<i>Velocidad (RPM)</i>	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	48	48
300	26	26
200	19	20
100	2	2
6	-	-
3	-	-

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 48 - 26$$

$$Vp = 22 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 26 - 22$$

$$Yp = 4 \frac{L}{100ft^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

En los requisitos de calidad de la Tabla 3.10. indica que la densidad debe ser 9.7 lpg, pero medido en balanza salió igual a 9.4 lpg, es decir no cumple con los requisitos del pozo, se observó que tiene baja viscosidad.

También indica la Tabla 3.10. que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, el valor de viscosidad sí cumple con 22 cP, pero el valor del punto cedente no con 4 L/100ft<sup>2</sup>, por lo que para las siguientes se decidió aumentar más masa de chíá debido al bajo valor del Punto cedente.

### 3.10. Cuarta prueba determinación de concentración de chía 1

Para la siguiente prueba se toma en cuenta los cálculos de formulación sin chía, donde se irá buscando llegar a los parámetros de reología, aumentando la cantidad de masa de chía que es equivalente a la concentración:

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.33. Valores para la cuarta prueba**

<i>N°</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$384.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1041.557$$

$$V_{H_2O} = 325.5 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 325.5 = 14.1 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se puede pasar a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.34. Cálculo de masas para la cuarta prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	14.1 * 4.2	59.22
7	Agua	325.5 * 1	325.5

Fuente: Elaboración propia

Para esta nueva medición se inició adicionando **5g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.15 \frac{lb}{gal} = 9.15 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el Anexo E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.35. Datos medidos con viscosímetro FANN de la cuarta prueba**

Velocidad (RPM)	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	40	40
300	25	26
200	20	21
100	12	12
6	6	6
3	3	4

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 40 - 25$$

$$Vp = 15 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 25 - 15$$

$$Yp = 10 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

En los requisitos de calidad de la Tabla 3.10. indica que la densidad debe ser 9.7 lpg, pero medido en balanza salió igual a 9.15 lpg valor bajo, donde se observó que la consistencia viscosa es muy baja pero mejor a la tercera prueba.



También indica la Tabla 3.10. que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, pero los valores de la prueba no están dentro de los parámetros con 15 cP y 10 L/100ft<sup>2</sup> que son valores bajos, por lo que se siguió adicionando masa de chía posteriormente.

### 3.11. Quinta prueba determinación de concentración de chía 2

Para la siguiente prueba se toma en cuenta la misma modalidad de la tercera prueba, donde se buscó llegar a los parámetros de calidad, principalmente de la reología ya que son los valores más importantes que debe cumplir, aumentando la cantidad de masa de chía en cada prueba ya que es equivalente a la concentración:

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.36. Valores para la quinta prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

V<sub>f</sub>=350 ml

d<sub>f</sub>= 9.7 lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$384.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1041.557$$

$$V_{H_2O} = 325.5 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 325.5 = 14.1 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se puede calcular la masa de cada uno de los aditivos:

**Tabla 3.37. Cálculo de masas para la quinta prueba**

N°	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	14.1 * 4.2	59.22
7	Agua	325.5 * 1	325.5

Fuente: Elaboración propia

Para esta nueva medición se empezó adicionando **10g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 8.75 \frac{lb}{gal} = 8.75 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el Anexo E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.38. Datos medidos con viscosímetro FANN de la quinta prueba**

Velocidad (RPM)	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	69	70
300	47	47
200	37	36
100	24	24
6	9	9
3	5	6

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 70 - 47$$

$$Vp = 23 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 47 - 23$$

$$Yp = 24 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO

En los requisitos de calidad de la Tabla 3.10. indica que la densidad debe ser 9.7 lpg, pero medido en balanza salió igual a 8.75 lpg que no cumple, es más, bajó mucho la densidad, donde se observó que la consistencia viscosa bajó.

También indica la Tabla 3.10. que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente los valores están dentro de los parámetros con 23 cP y 24 L/100ft<sup>2</sup>.

#### 3.12. Sexta prueba determinación de concentración de chía 3

Una observación muy importante de la quinta prueba es, que los valores de reología salieron dentro de los parámetros de requisitos, pero la densidad disminuyó casi en 1 lpg, por lo que se formulará para un lodo de 10.7 lpg para llegar a 9.7 lpg que es el valor requisito de densidad.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.39. Valores para la sexta prueba**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

V<sub>f</sub>=350 ml

d<sub>f</sub>= 10.7 lpg = 10.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$10.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.282 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$426.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 999.557$$

$$V_{H_2O} = 312.36 ml$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 312.36 = 27.22 \text{ ml}$$

Una vez obtenidos todos los volúmenes se calcula a continuación las masas de cada uno de los aditivos:

**Tabla 3.40. Cálculo de masas para la sexta prueba**

Nº	Aditivo	$V \text{ (ml)} * \rho \text{ (g/ml)}$	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	27.22 * 4.2	114.324
7	Agua	312.36 * 1	312.36

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se adicionó **9 g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 10.2 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} = 10.2 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el Anexo E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.41. Datos medidos con viscosímetro FANN de la sexta prueba**

Velocidad (RPM)	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	77	77
300	52	52
200	39	38
100	27	27
6	8	8
3	6	5

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 77 - 52$$

$$Vp = 25 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 52 - 25$$

$$Yp = 27 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

A pesar que no se trabaja con una densidad de chía oficial, la densidad resultó 10.2 lpg lejano al valor requisito de calidad de la Tabla 3.10. de 9.7 lpg, ya que al disminuir de 10.7 lpg a 10.2 lpg disminuyó solo en 0.5 lpg se observó una buena viscosidad, pero la densidad no salió satisfactoria.

También indica la Tabla 3.10. que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente los valores están dentro de los parámetros casi al medio con 25 cP y 27 L/100ft<sup>2</sup>, considerando que con 9 g se llega a la reología buscada.

### **3.13. Séptima prueba determinación de concentración de chía 4**

Una observación muy importante de la quinta prueba es que los valores de reología salieron dentro de los parámetros de requisitos, pero la densidad disminuyó casi en 1 lpg, se formulará para un lodo de 10.7 lpg para llegar a 9.7 lpg igual a la prueba anterior.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.42. Valores para la séptima prueba**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f = 350 \text{ ml}$

$d_f = 10.7 \text{ lpg} = 10.7 \text{ lb/gal}$  (Densidad teórica)

$$10.7 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} * \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.282 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}} = 0.472 \text{ ml}$$

$$V_{KCl} = \frac{10 \text{ g}}{1.987 \text{ g/ml}} = 5.033 \text{ ml}$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$



$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$426.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 999.557$$

$$V_{H_2O} = 312.36 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 312.36 = 27.22 \text{ ml}$$

Una vez obtenidos todos los volúmenes se calcula las masas de cada uno de los aditivos:

**Tabla 3.43. Cálculo de masas para la séptima prueba**

Nº	Aditivo	$V \text{ (ml)} * \rho \text{ (g/ml)}$	masa (g)
1	KOH	$0.472 * 2.12$	1
2	KCl	$5.05 * 1.987$	10
3	Bentonita	$4.35 * 2.3$	10
4	CMC	$0.56 * 1.8$	1
6	Barita	$27.22 * 4.2$	114.324
7	Agua	$312.36 * 1$	312.36

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se adicionó **10g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.85 \frac{lb}{gal} = 9.85 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el Anexo E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.44. Datos medidos con viscosímetro FANN de la séptima prueba**

<i>Velocidad (RPM)</i>	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	92	92
300	64	64
200	47	48
100	32	32
6	10	9
3	6	6

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 92 - 64$$

$$Vp = 28 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 64 - 28$$

$$Yp = 36 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

A pesar que no se trabaja con una densidad de chíá oficial, la densidad resultó 9.85 lpg cercano al valor requisito de calidad de la Tabla 3.10. de 9.7 lpg, tomando en cuenta que se formuló para 10.7 lpg se observó una buena viscosa.

También indica la Tabla 3.10. que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente los valores están dentro de los parámetros con 28 cP y 36 L/100ft<sup>2</sup>, pero al no trabajar con un valor oficial de

densidad de chía aún la prueba queda pendiente, considerando que con 10 g se llega a la reología buscada también con resultados diferentes a 9 g.

### 3.14. Octava prueba determinación de concentración de chía 5

Para esta prueba se mantendrá la formulación para un lodo de 10.7 lpg pero se aumentará un gramos a la masa de chía para analizar si el lodo aún se mantiene dentro de los parámetros de requisitos.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.45. Valores para la octava prueba**

<i>N°</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración (lb/bbl)</i>	<i>Densidad (g/ml)</i>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 10.7$  lpg = 10.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$10.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.282 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.282 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$426.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 999.557$$

$$V_{H_2O} = 312.36 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 312.36 = 27.22 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se pasa a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.46. Cálculo de masas para la octava prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	27.22* 4.2	114.324
7	Agua	312.36 * 1	312.36

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se adicionó **11 g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 10.1 \frac{lb}{gal} = 10.1 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.47. Datos medidos con viscosímetro FANN de la octava prueba**

Velocidad (RPM)	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	108	108
300	71	71
200	55	55
100	39	37
6	11	11
3	7	6

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 108 - 71$$

$$Vp = 37 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 71 - 37$$

$$Yp = 34 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO

La densidad resultó 10.1 lpg lejano al requisito de la Tabla 3.10. de 9.7 lpg, se observó una viscosidad más espesa con 11 g que la anterior prueba de 10 g.

La Tabla 3.10. indica que la Viscosidad debe estar de 15-30cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, en esta prueba no cumple el valor de Vp con 37 cP aunque si está dentro del requisito de Punto cedente con 34 L/100ft<sup>2</sup>, como ya rebasa los valores de Vp queda descartada.

### 3.15. Novena prueba determinación de concentración de chía 6

Viendo las pruebas anteriores se analizó la formulación para un lodo de 10.3 lpg pero se disminuirá la masa de chía para analizar si el lodo presenta parámetros dentro de los requisitos.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.48. Valores para la novena prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

V<sub>f</sub>=350 ml

d<sub>f</sub>= 10.3 lpg = 10.3 lb/gal (Densidad teórica)

$$10.3 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.234 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.234 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.234 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.234 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$409.9 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1016.357$$

$$V_{H_2O} = 317.61 ml$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 317.61 = 21.97 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se puede pasar a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.49. Cálculo de masas para la novena prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	21.97* 4.2	92.27
7	Agua	317.61 * 1	317.61

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se adicionará **7 g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 10.1 \frac{lb}{gal} = 10.1 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.50. Datos medidos con viscosímetro FANN de la novena prueba**

Velocidad (RPM)	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	65	66
300	42	42
200	32	33
100	21	22
6	4	4
3	3	3

Fuente: Elaboración propia



Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 66 - 42$$

$$Vp = 24 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 42 - 24$$

$$Yp = 18 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### ANÁLISIS GENERAL: **NO SATISFACTORIO**

La densidad resultó 10.1 lpg lejano al requisito de la Tabla 3.10 de 9.7 lpg, se observó baja viscosidad.

También indica la Tabla 3.10 que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, donde el valor de Vp cumple con 24 cP pero el Punto cedente no cumple con 18 L/100ft<sup>2</sup> y al notar una baja viscosidad la prueba queda descartada.

### 3.16. Décima prueba determinación de concentración de chía 7

Al igual que la formulación anterior para un lodo de 10.3 lpg se analizó si el lodo presenta parámetros dentro de los requisitos con 8 g de chía.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.51. Valores para la décima prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 10.3$  lpg = 10.3 lb/gal (Densidad teórica)

$$10.3 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.234 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.234 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.234 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.234 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$409.9 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1016.357$$

$$V_{H_2O} = 317.61 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 317.61 = 21.97 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se puede pasar a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.52. Cálculo de masas para la décima prueba**

Nº	Aditivo	$V \text{ (ml)} * \rho \text{ (g/ml)}$	masa (g)
1	KOH	$0.472 * 2.12$	1
2	KCl	$5.05 * 1.987$	10
3	Bentonita	$4.35 * 2.3$	10
4	CMC	$0.56 * 1.8$	1
6	Barita	$21.97 * 4.2$	92.27
7	Agua	$317.61 * 1$	317.61

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se adicionó **8 g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.8 \frac{lb}{gal} = 9.8 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.53. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décima prueba**

<i>Velocidad (RPM)</i>	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	88	89
300	53	53
200	41	41
100	27	27
6	12	12
3	7	8

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 88 - 53$$

$$Vp = 35 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 53 - 35$$

$$Yp = 18 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

La densidad resultó 9.8 lpg cerca al requisito de la Tabla 3.10 de 9.7 lpg, se observó más viscosidad que la anterior prueba, con una formulación de 10.3 lpg la densidad se acercó reduciendo en 0.5

También indica la Tabla 3.10 que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, donde no cumple rebasando con el valor de Vp de 35 cP y tampoco con el valor de Yp de 18 L/100ft<sup>2</sup> que está por debajo de lo acordado.

### **3.17. Décima primera prueba determinación de concentración de chía 8**

Para esta décima primera prueba se trituró la chía en licuadora por un tiempo de 7 min para que las partículas sean más uniformes y no así como la anterior muestra que presentaba partículas de distinto tamaño.

Se volvió a considerar un lodo de 9.7 lpg para corroborar que la densidad del fluido disminuya aproximadamente en 1 con 9 g y que la reología esté dentro de los parámetros como anteriormente había resultado con 10.7 lpg.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.54. Valores para la décima primera prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Barita	-	4.2
6	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + [4.2 * (339.585 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$384.7 = 1426.257 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 1041.557$$

$$V_{H_2O} = 325.5 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 339.585 - 325.5 = 14.1 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se pasa a calcular la masa de cada uno de los aditivos.

**Tabla 3.55. Cálculo de masas para la décima primera prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
6	Barita	14.1 * 4.2	59.22
7	Agua	325.5 * 1	325.5

Fuente: Elaboración propia

Para esta nueva medición se empezará adicionando **9 g de chía**.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.55 \frac{lb}{gal} = 9.55 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.56. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décima primera prueba**

<i>Velocidad (RPM)</i>	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	67	66
300	44	44
200	34	34
100	24	24
6	4	5
3	3	4

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 66 - 44$$

$$Vp = 22 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 44 - 22$$

$$Yp = 22 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

### **ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO**

Según la cronología de las anteriores pruebas, el fluido debió haber salido mucho menor que 9.5 lpg, lo que lleva a la conclusión que **los diámetros de las partículas afectan al fluido** y es necesario encontrar la densidad correcta de la

chía, con la nueva chía molida se tuvo un resultado diferente que alteró la cronología de las pruebas anteriores a pesar que presenta una buena viscosidad. Los requisitos de la Tabla 3.10. indican que la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente ambos valores están dentro de los parámetros con 22 cP y 22 L/100ft<sup>2</sup>, pero la prueba queda descartada al no cumplir el requisito de densidad.

### **3.18. Proceso de tamizado de harina de chía molida en molienda.**

Al notar que la diferencia de diámetro de las partículas, es decir, al no ser uniforme y homogéneo se notó que afecta el valor de la densidad de la chía, por lo que, se consideró conseguir una muestra de 3 Kg de chía procesada en una molienda industrial para obtener partículas las más pequeñas posibles, comercializada en tiendas del mercado popular del Pasaje Ortega en la ciudad de La Paz mostrada en la Figura 3.13.

**Figura 3.13. Puesto de venta de cereales procesados en molino**



Fuente: Elaboración propia

Para obtener chía con partículas de diámetro uniforme se realizó el tamizado de esta masa de 3 Kg con 2 tipos de malla que se encuentran en el laboratorio de fluidos, para el desarrollo de este procedimiento se utilizó tamiz malla 40 que se muestra en la Figura 3.14 y tamiz malla 100 de la Figura 3.15.



**Figura 3.14. Tamizado de la chía en malla 40**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.15. Tamizado de la chía en Malla 100**



Fuente: Elaboración propia

El tamiz malla N° 40 de prueba ASTM E11 de 203 mm (8 in) de diámetro tiene una tela de alambre tejido de acero inoxidable con aberturas N°40 (425  $\mu$ m) y un

marco de latón de altura completa, que significa que hay 40 aberturas por pulgada cuadrada.

El tamiz de prueba ASTM E11 de 203 mm (8 in) de diámetro tiene una tela de alambre tejido de acero inoxidable con aberturas N° 100 (150  $\mu\text{m}$ ) y un marco de acero inoxidable de altura completa, que significa que hay 100 aberturas por pulgada cuadrada.

Es decir, el diámetro de las partículas de la chía varía de **150  $\mu\text{m}$  a 425  $\mu\text{m}$** , donde hubo una masa considerable que fue descartada que llegan a ser los remanentes que no pasaron la malla 40 y lo que pasaron por la malla 100.

### **3.19. Determinación de densidad de la chía con aceite (D2)**

Ya obteniendo la masa tamizada más uniforme, se realizó la medición por el método de **Determinación de densidad de un sólido** donde en la Figura 3.16 se muestra la probeta de 10 ml encima de la balanza analítica pesando solo una cantidad de chía que se lo introdujo muy cuidadosamente para que no quedase restos de partículas de chía en las paredes de la probeta.

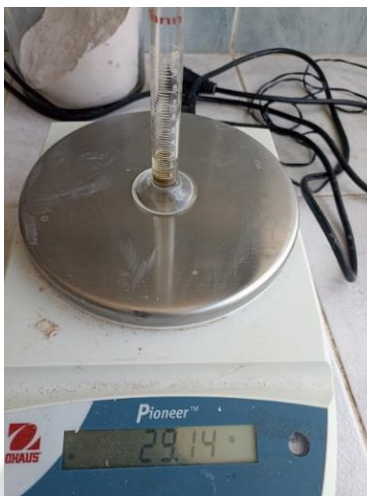
**Figura 3.16. Pesaje de la chía en balanza**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.17. se introdujo una cantidad de aceite de gota en gota con una pipeta hasta un volumen visible de la probeta con mucho cuidado para evitar que las gotas al caer a la probeta remuevan partículas de chía ya depositadas.

**Figura 3.17. Pesaje de la chía con aceite**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.18. se muestra la lectura visual evitando malas lecturas como el error de paralaje del volumen total en las graduaciones de la probeta de 10 ml obteniendo así un dato muy importante considerando que se debe leer la parte inferior del menisco formado por el aceite.

**Figura 3.18. Lectura del volumen en probeta**



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de esta densidad se tiene las siguientes ecuaciones:

$$m_{CHIA} = m_1 - m_o$$

$$m_{Aceite} = m_2 - m_1$$

$$V_{CHIA} = V_T - V_{Aceite}$$

Donde:

$m_o$  = Masa de probeta vacía

$m_1$  = Masa chía + Masa probeta

$m_2$  = Masa chía + Masa probeta + Masa aceite

$V_{Total}$  = Vol chía + Vol aceite

$D_{aceite}$  = 0.92 g/ml

### Prueba 1

$$m_o = 27.552 \text{ g}$$

$$m_1 = 27.67 \text{ g}$$

$$m_2 = 35.87 \text{ g}$$

$$V_T = 9.1 \text{ ml}$$

$$m_{Aceite} = 35.87 \text{ g} - 27.67 \text{ g} = 8.2 \text{ g}$$

$$V_{Aceite} = \frac{m_{Aceite}}{\rho_{Aceite}} = \frac{8.2 \text{ g}}{0.92 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 8.913 \text{ ml}$$

$$V_{CHIA} = V_T - V_{aceite} = 9.1 \text{ ml} - 8.913 \text{ ml} = 0.187 \text{ ml}$$

$$m_{CHIA} = 27.67 \text{ g} - 27.552 \text{ g} = 0.118 \text{ g}$$

$$\rho_{CHIA} = \frac{m_{CHIA}}{V_{CHIA}} = \frac{0.118 \text{ g}}{0.187 \text{ ml}} = 0.63 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

## Prueba 2

$$m_o = 27.18 \text{ g}$$

$$m_1 = 27.40 \text{ g}$$

$$m_2 = 29.14 \text{ g}$$

$$V_T = 2.2 \text{ ml}$$

$$m_{\text{Aceite}} = 29.14 \text{ g} - 27.40 \text{ g} = 1.74 \text{ g}$$

$$V_{\text{Aceite}} = \frac{m_{\text{Aceite}}}{\rho_{\text{Aceite}}} = \frac{1.74 \text{ g}}{0.92 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 1.89 \text{ ml}$$

$$V_{\text{CHIA}} = V_T - V_{\text{aceite}} = 2.2 \text{ ml} - 1.89 \text{ ml} = 0.31 \text{ ml}$$

$$m_{\text{CHIA}} = 27.40 \text{ g} - 27.18 \text{ g} = 0.22 \text{ g}$$

$$\rho_{\text{CHIA}} = \frac{m_{\text{CHIA}}}{V_{\text{CHIA}}} = \frac{0.22 \text{ g}}{0.31 \text{ ml}} = 0.71 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Calculando la media aritmética:

$$\rho_{\text{CHIA}} = \frac{0.63 \frac{\text{g}}{\text{ml}} + 0.71 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}{2} = 0.67 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

La densidad final de la chía medido aceite resulta 0.67 g/ml, realizar las pruebas de esta medición fué delicado ya que se trabaja con cantidades pequeñas y puede que este valor no sea exacto, debido a los espacios de aire que pueda existir entre las moléculas de chía al igual que al caer gotas de aceite algunas partículas de chía escapaban a las paredes de la probeta de 10ml haciendo que no se considere su volumen.

### **3.20. Décimo segunda prueba con D2**

Una vez obtenida la masa tamizada, se realiza esta prueba donde se volvió a considerar un lodo de 9.7 lpg dato requisito según Tabla 3.10 y corroborar que la reología esté dentro de los parámetros con la nueva densidad D2 calculada de forma experimental con aceite.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.57. Valores para la décimo segunda prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Chía	9	0.67
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

$$V_{Chía} = \frac{9 g}{0.67 g/ml} = 13.433 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{CHIA} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + 13.433 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 326.152 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{CHIA} * V_{CHIA} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + m_{CHIA} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 9 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 9 + [4.2 * (326.152 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$375.7 = 1369.84 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 994.14$$

$$V_{H_2O} = 310.67 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 326.152 - 310.67 = 15.48 \text{ ml}$$

Una vez obtenido los volúmenes se calcula la masa de cada uno de los aditivos:

**Tabla 3.58. Cálculo de masas para la décimo segunda prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
5	Chía	13.433 * 0.67	9
6	Barita	15.48 * 4.2	65.02
7	Agua	310.67 * 1	310.67

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se está usando la concentración de 9 que representa **9 g de chía**, gracias a las pruebas anteriores satisfactorias en reología.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.61 \frac{lb}{gal} = 9.61 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.59. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décimo segunda prueba**

<i>Velocidad (RPM)</i>	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	78	78
300	54	53
200	42	42
100	28	28
6	6	6
3	4	4

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 78 - 53$$

$$Vp = 25 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 53 - 25$$

$$Yp = 28 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$



## ANÁLISIS GENERAL: NO SATISFACTORIO

La densidad resultó 9.61 lpg que es un valor cercano al valor requisito de 9.7 lpg pero NO es exacto, también la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente ambos valores están dentro de los parámetros de reología con 25 cP y 28 L/100ft<sup>2</sup>, lo que corrobora que la concentración de la chía es correcta con 9 g.

### 3.21. Cálculo de la densidad real de la chía (D3)

Al tener un diámetro de partículas más homogéneo, se consideró el resultado experimental del fluido de la **décimo segunda prueba** de 9.61 lpg para hallar la densidad real de la chía por cálculo inverso.

$d_f = 9.61 \text{ lpg} = 9.61 \text{ lb/gal}$  (Densidad teórica)

$$9.61 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} * \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.152 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

**Tabla 3.60. Cálculo de la masa total del fluido**

N°	Aditivo	$V \text{ (ml)} * \rho \text{ (g/ml)}$	masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.05 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	CMC	0.56 * 1.8	1
5	Chía	13.433 * 0.67	9
6	Barita	15.48 * 4.2	65.02
7	Agua	310.67 * 1	310.67
$\Sigma \text{ masas}$			406.69

Fuente: Elaboración propia

Calculando el volumen total del fluido:

$$V_{\text{Fluido}} = \frac{m_{\text{Fluido}}}{\rho_{\text{Fluido}}} = \frac{406.69 \text{ g}}{1.152 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 353.03 \text{ ml}$$

Calculando el volumen real de chía:

$$V_{\text{Fluido}} = V_{\text{KOH}} + V_{\text{KCl}} + V_{\text{Bentonita}} + V_{\text{CMC}} + V_{\text{CHIA}} + V_{\text{Barita}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$353.03 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + V_{\text{CHIA}} + 15.48 + 310.67$$

$$V_{\text{CHIA}} = 16.465 \text{ ml}$$

Cálculo de la densidad real de la chía considerando los 9 g pesados para la décimo segunda prueba:

$$\rho_{\text{CHIA}} = \frac{m_{\text{CHIA}}}{V_{\text{CHIA}}} = \frac{9 \text{ g}}{16.465 \text{ ml}} = 0.55 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$\rho_{\text{CHIA}} = 0.55 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

La densidad real de la masa de chía obtenida es 0.55 g/ml.

### 3.22. Décimo tercera prueba con D3

Habiendo obtenido la densidad de chía real, se preparará 500 ml de fluido, se considera un lodo de 9.7 lpg dato requisito y se busca corroborar que la reología esté dentro de los parámetros con la nueva densidad D3.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.61. Valores para la décimo tercera prueba**

N°	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Chía	9	0.55
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, se calcula los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{9 g}{0.55 g/ml} = 16.36 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{CHIA} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + 16.36 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 323.225 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{CHIA} * V_{CHIA} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + m_{CHIA} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 9 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 9 + [4.2 * (323.225 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$375.7 = 1357.545 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 981.845$$

$$V_{H_2O} = 306.83 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 323.225 - 306.83 = 16.4 \text{ ml}$$

Calculo para 500 ml de fluido mediante la regla de tres:

**Tabla 3.62. Cálculo de masas para la décimo tercera prueba**

Nº	Aditivo	V (ml)	V (ml)	$\rho$ (g/ml)	masa (g)
1	KOH	0.472	0.674	2.12	1.43
2	KCl	5.033	7.19	1.987	14.29
3	Bentonita	4.35	6.21	2.3	14.28
4	CMC	0.56	0.8	1.8	1.44
5	Chía	16.36	23.37	0.55	12.85
6	Barita	16.4	23.43	4.2	98.41
7	Agua	306.83	438.33	1	438.33
	$\Sigma$	350 ml	500ml		

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se está usando la concentración de 9 que representa **9 g de chía**, gracias a las pruebas anteriores satisfactorias en reología.

En la Figura 3.19. se muestra la calibración de la balanza de lodo con agua, cabe recalcar que existen varias balanzas en laboratorio descalibradas.

**Figura 3.19. Calibración de la balanza de lodo con agua**



Fuente: Elaboración propia

Cabe recalcar que en laboratorio existen varias balanzas descalibradas es por tal razón que se eligió una balanza en específico para realizar todas las pruebas.

En la Figura 3.20. se muestra el lodo en el vaso de la balanza una vez terminado el proceso de elaboración, donde al colocar su respectiva tapa se debe limpiar el exceso de lodo que sale por el medio y los costados del vaso.

**Figura 3.20. Lodo en el vaso de la balanza**



Fuente: Elaboración propia

Una vez limpiado el vaso, se procede a mover la báscula hasta que el lodo llegue a un equilibrio donde la burbuja de equilibrio quede en el centro y se procede a la lectura de la pesa.

**Figura 3.21. Lectura de densidad en equilibrio**



Fuente: Elaboración propia

Al realizar la medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo resultó ser:

$$\rho_f = 9.7 = 9.7 \text{ lpg}$$

A continuación, se describe la medición de la reología con viscosímetro FANN donde la Figura 3.22. muestra el montaje del viscosímetro FANN donde presenta un pedestal regulable que sirve de soporte para el vaso que contiene el lodo para luego poner en funcionamiento el rotor.

**Figura 3.22. Montaje del Viscosímetro FANN**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.23. se ve el rotor sumergido en el lodo elaborado, que una vez activado la lectura gira de acuerdo a la velocidad elegida.

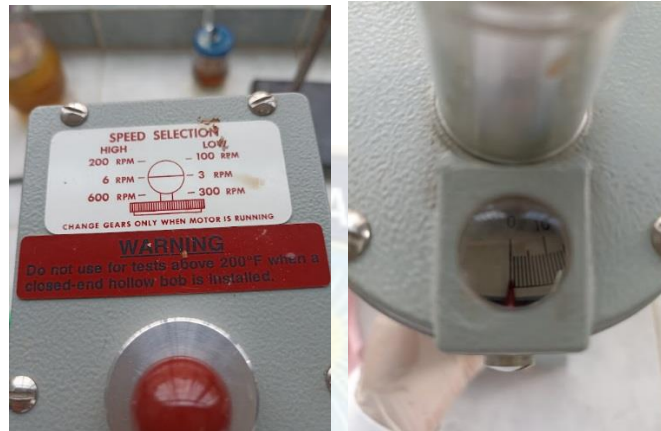
**Figura 3.23. Medición de viscosidad del lodo en RPM**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.24 se muestra la guía de velocidades plasmada en la superficie superior del viscosímetro FANN y también el lente donde se realiza la lectura de la viscosidad en cP.

**Figura 3.24. Lecturas de RPM del viscosímetro**



Fuente: Elaboración propia

Se midió la reología dos veces mediante el viscosímetro FANN para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.63. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décimo tercera prueba**

<i>Velocidad (RPM)</i>	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
<i>600</i>	<i>80</i>	<i>80</i>
<i>300</i>	<i>55</i>	<i>54</i>
<i>200</i>	<i>43</i>	<i>42</i>
<i>100</i>	<i>29</i>	<i>29</i>
<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>
<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 80 - 55$$

$$Vp = 25 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 55 - 25$$

$$Yp = 30 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

A continuación, se describe la Figura 3.25. que muestra el equipo Filtro prensa API que compone de varias piezas de metal inoxidable, el vaso se llenó con el lodo hasta que sobre un dedo de espesor vacío, donde se somete a altas presiones mediante una cápsula controlada por un manómetro en psi.

**Figura 3.25. Montaje del equipo Filtro API con el lodo**



Fuente: Elaboración propia

Una vez puesta en marcha la presión para el filtrado se debe acomodar una probeta de 10 ml en la parte inferior del vaso para recepcionar las gotas del líquido filtrado por el lapso de 30 minutos como se observa en la Figura 3.26, en la cual mediante un cronómetro se debe anotar la lectura del volumen de líquido en la probeta cada 30 segundos.



**Figura 3.26. Obtención del filtrado en probeta de 10ml**



Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la lectura después de los 30 min, se extrae el papel filtro vaciando el lodo del vaso en su totalidad y desmontando cuidadosamente para no afectar la superficie del papel filtro, obteniendo la Figura 3.27.

**Figura 3.27. Extracción del revoque al desmontar**



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados de la prueba de Filtro API de esta prueba por un periodo de 30 minutos:

**Tabla 3.64. Resultados filtro API décimo tercera prueba**

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (ml)</i>
00:30	0.3	10:30	3.1	20:30	4.8
01:00	0.5	11:00	3.3	21:00	4.9
01:30	0.8	11:30	3.4	21:30	5
02:00	1	12:00	3.5	22:00	5
02:30	1.2	12:30	3.6	22:30	5.1
03:00	1.3	13:00	3.7	23:00	5.2
03:30	1.5	13:30	3.8	23:30	5.3
04:00	1.6	14:00	3.9	24:00	5.3
04:30	1.8	14:30	4	24:30	5.4
05:00	2	15:00	4	25:00	5.4
05:30	2.1	15:30	4.1	25:30	5.5
06:00	2.3	16:00	4.2	26:00	5.5
06:30	2.4	16:30	4.2	26:30	5.6
07:00	2.5	17:00	4.3	27:00	5.7
07:30	2.6	17:30	4.3	27:30	5.8
08:00	2.7	18:00	4.4	28:00	5.8
08:30	2.8	18:30	4.5	28:30	5.9
09:00	2.9	19:00	4.6	29:00	5.9
09:30	3	19:30	4.6	29:30	6
10:00	3	20:00	4.7	30:00	6

Fuente: Elaboración propia

### **ANÁLISIS GENERAL: SATISFACTORIO**

Los requisitos de calidad de la Tabla 3.10. indican que la densidad debe llegar a 9.7 lpg que es el mismo valor que se logró obtener en la prueba, también la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente ambos valores están dentro de los parámetros con 25 cP y

30 L/100ft<sup>2</sup>, también que el volumen del filtro API debe ir de 5ml a 7ml; afortunadamente la prueba llega a 6ml/30min, la prueba cumple con todos los requisitos y queda aprobada.

### 3.23. Décimo cuarta prueba con D3

Habiendo obtenido la densidad de chía real, se preparará 500 ml de fluido, se considera un lodo de 9.7 lpg dato requisito y se busca corroborar que la reología esté dentro de los parámetros con la nueva densidad D3.

De las cuales los cálculos son:

**Tabla 3.65. Valores para la décimo cuarta prueba**

Nº	Aditivo	Concentración (lb/bbl)	Densidad (g/ml)
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	CMC	1	1.8
5	Chía	10	0.55
6	Barita	-	4.2
7	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

V<sub>f</sub>=350 ml

d<sub>r</sub>= 9.7 lpg = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, calcularemos los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}} = 4.35 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{1 \text{ g}}{1.8 \text{ g/ml}} = 0.56 \text{ ml}$$

$$V_{CMC} = \frac{10 \text{ g}}{0.55 \text{ g/ml}} = 18.18 \text{ ml}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{CMC} + V_{CHIA} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.56 + 18.18 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 321.405 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{CMC} * V_{CMC} + \rho_{CHIA} * V_{CHIA} \\ + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{CMC} + m_{CHIA} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 10 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 10 + [4.2 * (321.405 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$374.7 = 1349.9 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 975.2$$

$$V_{H_2O} = 304.75 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 321.405 - 304.75 = 16.66 \text{ ml}$$

Una vez calculado los volúmenes se procede a calcular las masas para 500 ml de fluido mediante la regla de tres:

**Tabla 3.66. Cálculo de masas para la décimo cuarta prueba**

Nº	Aditivo	V (ml)	V (ml)	$\rho$ (g/ml)	Masa (g)
1	KOH	0.472	0.674	2.12	1.43
2	KCl	5.033	7.19	1.987	14.29
3	Bentonita	4.35	6.21	2.3	14.28
4	CMC	0.56	0.8	1.8	1.44
5	Chía	18.18	25.97	0.55	14.28
6	Barita	16.66	23.8	4.2	99.96
7	Agua	304.75	435.36	1	435.36
	$\Sigma$	350 ml	500ml		

Fuente: Elaboración propia

Para esta prueba se está usando la concentración de 10 que representa **10 g de chía**, gracias a las pruebas anteriores satisfactorias en reología.

Medición de la densidad de lodo experimental en balanza de lodo descrito en el ANEXO D:

$$\rho_f = 9.7 = 9.7 \text{ lpg}$$

Se midió la reología mediante el viscosímetro FANN descrito en el ANEXO E donde se midió dos veces para corroborar la veracidad de los valores obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 3.67. Datos medidos con viscosímetro FANN de la décimo cuarta prueba**

Velocidad (RPM)	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$
600	88	88
300	60	59
200	48	47
100	34	34
6	10	9
3	8	8

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en las ecuaciones de Viscosidad plástica y Punto cedente:

$$Vp = \theta_{600} - \theta_{300} = 88 - 60$$

$$Vp = 28 \text{ cP}$$

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 60 - 28$$

$$Yp = 32 \frac{L}{100 \text{ ft}^2}$$

Se realizó la prueba de filtro API según el procedimiento del Anexo F.

**Tabla 3.68. Resultados filtro API décimo cuarta prueba**

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (ml)</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Volumen (ml)</i>
00:30	0.2	10:30	2.5	20:30	4.4
01:00	0.2	11:00	2.7	21:00	4.5
01:30	0.3	11:30	2.9	21:30	4.6
02:00	0.5	12:00	3	22:00	4.7
02:30	0.6	12:30	3.1	22:30	4.8
03:00	0.7	13:00	3.2	23:00	4.9
03:30	0.8	13:30	3.3	23:30	4.9
04:00	0.9	14:00	3.4	24:00	5
04:30	1	14:30	3.5	24:30	5
05:00	1.1	15:00	3.6	25:00	5.1
05:30	1.2	15:30	3.7	25:30	5.2
06:00	1.4	16:00	3.8	26:00	5.3
06:30	1.5	16:30	3.9	26:30	5.4
07:00	1.7	17:00	4	27:00	5.4
07:30	1.8	17:30	4	27:30	5.5
08:00	2	18:00	4.1	28:00	5.5
08:30	2.2	18:30	4.2	28:30	5.6
09:00	2.3	19:00	4.3	29:00	5.7
09:30	2.3	19:30	4.3	29:30	5.7
10:00	2.4	20:00	4.4	30:00	5.8

Fuente: Elaboración propia

## ANÁLISIS GENERAL: SATISFACTORIO

La densidad resultó 9.7 lpg que es el valor requisito que se estaba buscando, también la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>, satisfactoriamente ambos valores están dentro de los parámetros con 28 cP y 32 L/100ft<sup>2</sup>, también indica que el volumen del filtro API debe ir de 5ml a 7ml; afortunadamente la prueba llega a 5.8ml/30min, ya no se realizó mas pruebas como con 11 g ya que se evidenció que no cumple con los requisitos.

### 3.24. Resumen de las pruebas realizadas

A continuación, se presenta la Tabla 3.69 mostrando cada una de las pruebas realizadas tomando en cuenta que la densidad teórica es iguala 9.7 lpg, la Viscosidad debe estar de 15-30 cP y el Punto cedente de 20-40 L/100ft<sup>2</sup>:

**Tabla 3.69. Resumen de pruebas realizadas**

N° Prueba	$m_{chia}$ (g)	$\rho_{exp}$ (lpg)	$Vp$ (cP) y $Yp$ ( $\frac{L}{100 ft^2}$ )	Observaciones
1	25	13	-	No satisfactorio
2	25	12	135 $\wedge$ 130	No satisfactorio
3	3	9.4	22 $\wedge$ 4	No satisfactorio
4	5	9.15	15 $\wedge$ 10	No satisfactorio
5	10	8.75	23 $\wedge$ 24	No satisfactorio
6	9	10.2	25 $\wedge$ 27	No satisfactorio
7	10	9.85	28 $\wedge$ 36	No satisfactorio
8	11	10.1	37 $\wedge$ 34	No satisfactorio
9	7	10.1	24 $\wedge$ 18	No satisfactorio
10	8	9.8	35 $\wedge$ 18	No satisfactorio
11	9	9.55	22 $\wedge$ 22	No satisfactorio
12	9	9.61	25 $\wedge$ 28	No satisfactorio
13	9	9.7	25 $\wedge$ 30	Satisfactorio
14	10	9.7	28 $\wedge$ 32	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia

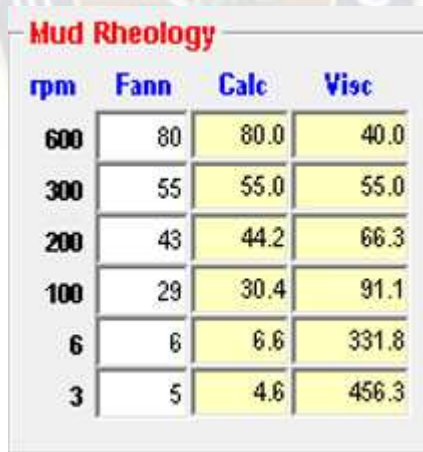
### 3.25. Análisis reológico del fluido con el programa MUDWARE

El software de ingeniería MUDWARE es una colección de información técnica y programas de ingeniería relacionados con lodos y perforaciones que se proporciona de forma gratuita a la industria petrolera. Este software contiene la mayoría de los cálculos que normalmente se utilizan en el campo durante la perforación y terminación de un pozo (Schlumberger, 2022).

Los fluidos de perforación se optimizan de una manera que nadie más puede: para completar su sistema de perforación con la experiencia adecuada en cualquier momento y desde cualquier lugar, para obtener los resultados correctos en sus operaciones de perforación (Schlumberger, 2022).

Para el análisis del fluido de perforación a partir de la semilla de chía en el programa Mudware, se debe considerar los datos de reología de la Tabla 3.63. datos que se ingresa al programa mostradas en la Figura 3.28.:

**Figura 3.28. Datos de reología de la décimo tercera prueba**



rpm	Fann	Calc	Visc
600	80	80.0	40.0
300	55	55.0	55.0
200	43	44.2	66.3
100	29	30.4	91.1
6	6	6.6	331.8
3	5	4.6	456.3

Fuente: Elaboración propia

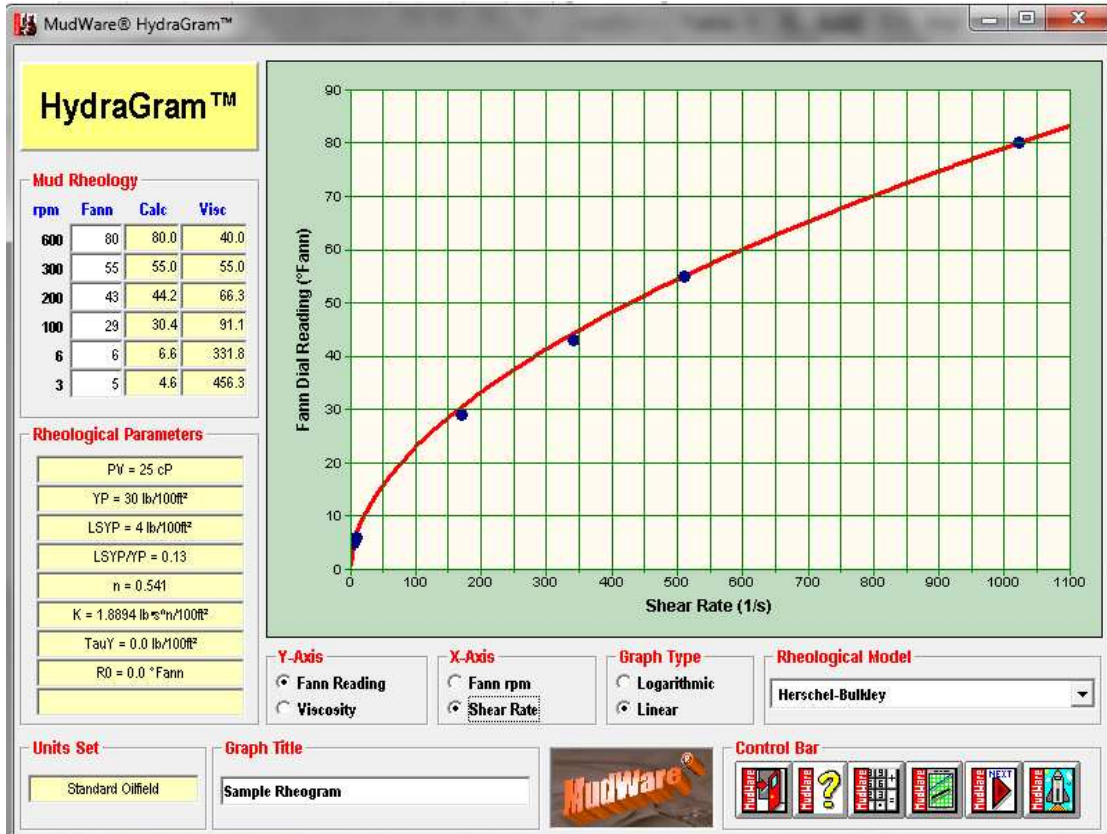
Según el programa los datos deben acomodarse al modelo reológico de Herschel-Bulkley, donde los puntos deben encajar en la curva, la razón es porque los lodos donde que tienen polímeros bentónicos y CMC se acomodan a este tipo de curvatura obteniendo dos tipos de gráficas representadas en la Figura 3.29. y



Figura 3.30., si se escoge otro tipo de Modelo reológico como el de API, Bingham Plastic o Power Law los datos no encajan como en la de Herschel-Bulkley:

Ambas Figuras muestran sus parámetros reológicos calculados por el mismo programa, que son los mismos calculados en la décimo tercera prueba.

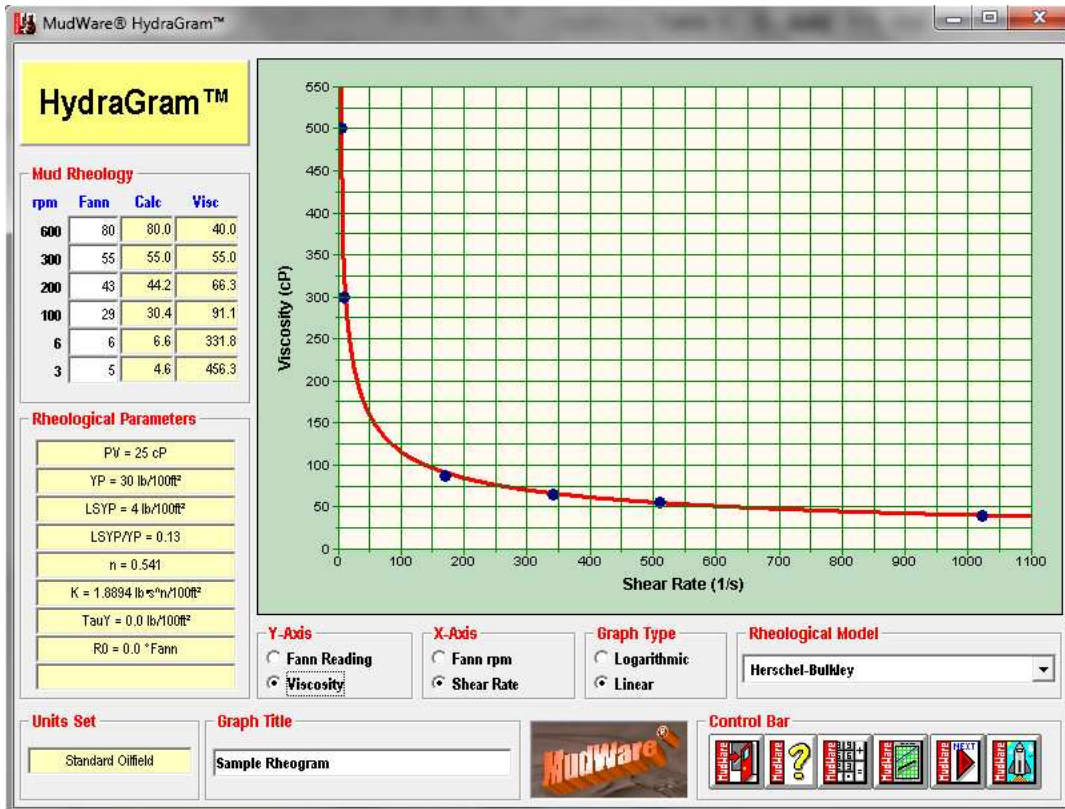
**Figura 3.29. Modelo Herschel Bulkley con las lecturas de FANN**



Fuente: Elaboración propia

Para la Figura 3.29. se puede interpretar que el fluido está dentro del comportamiento general que es el de Herschel Bulkley y que, a mayor velocidad angular aplicada, mayor será la resistencia del fluido, es decir, la chía aporta una viscosidad resistente muy favorable debido al mucílago.

Figura 3.30. Modelo Herschel Bulkley con las viscosidades



Fuente: Elaboración propia

Para la Figura 3.30. se puede interpretar que a mayor velocidad angular el fluido por su tixotropía tiende a presentar una consistencia menos viscosa que cuando está estático, ya que se muestra espeso en reposo.

### 3.25.1. Modelo reológico de Herschel-Bulkley

Según el programa Mudware el fluido de perforación se adecua al modelo reológico de Herschel-Bulkley por el método de los tres puntos, la razón es porque se usa polímero bentónico y CMC, donde indica las propiedades del fluido mostrando dos tipos de gráficas, a continuación, se realiza los cálculos representativos de este modelo para llegar a formar las anteriores gráficas:

Ecuación de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_o + K\gamma^n$$

Donde:

$\tau = \text{Esfuerzo de corte (lb/ft}^2\text{)}$

$\tau_o = \text{Esfuerzo de cedencia o fuerza para iniciar el flujo}$

$K = \text{Indice de consistencia}$

$\gamma = \text{Velocidad de corte (1/seg)}$

$n = \text{Indice de ley exponencial}$

A su vez, el esfuerzo y velocidad de corte van representadas de la siguiente forma:

$$\gamma = 1.703 * RPM$$

$$\tau = 1.0678 * \theta$$

El método de los tres puntos consiste en tomar en cuenta las lecturas de 600, 300 y la media entre 6 y 3, es decir para un valor de 4.5.

$$\tau_{600} = \tau_o + K(\gamma_{600})^n$$

$$\tau_{300} = \tau_o + K(\gamma_{300})^n$$

$$\tau_{4.5} = \tau_o + K(\gamma_{4.5})^n$$

Tomando en cuenta la siguiente tabla experimental del viscosímetro FANN.

**Tabla 3.70. Resultados del viscosímetro FANN**

<b>Velocidad (RPM)</b>	<b><math>\vartheta_1</math></b>
600	80
300	55
6	6
4.5	5.5
3	5

Fuente: Elaboración propia

Obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$80 = \tau_o + K(1021.8)^n$$

$$55 = \tau_o + K(510.9)^n$$

$$5.5 = \tau_o + K(7.66)^n$$

Resolviendo las tres ecuaciones con tres incógnitas:

$$\tau_o = 0.084 \text{ } ^\circ\text{Fann} * 1.0678 = 0.09 \frac{\text{lb}}{100 \text{ ft}^2}$$

$$K = 1.7745 \frac{\text{lb} * \text{s}^n}{100 \text{ ft}^2}$$

$$n = 0.548$$

De acuerdo a los resultados la ecuación de la curva sería:

$$\tau = 0.084 + 1.7745\gamma^{0.548}$$

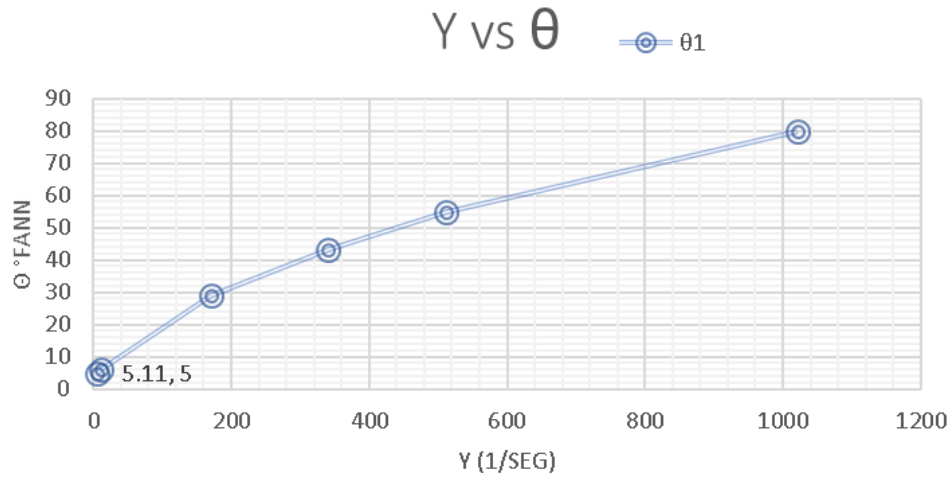
**Tabla 3.71. Resultados de velocidad de corte**

<i>Velocidad (RPM)</i>	<i><math>\vartheta_1</math></i>	<i><math>\gamma</math> (1/seg)</i>
600	80	1021.8
300	55	510.9
200	43	340.6
100	29	170.3
6	6	10.22
3	5	5.11

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se procede a realizar la Figura 3.31. para saber si el fluido realmente se ajusta al modelo que se está buscando de Herschel-Bulkley con las lecturas del viscosímetro FANN

**Figura 3.31. Gráfica de velocidad de corte vs FANN**



Fuente: Elaboración propia

La gráfica salió idéntica a la gráfica de la Figura 3.11 que sacó el programa Mudware que ya fue interpretado.

### 3.25.2. Determinación de propiedades reológicas

Para la viscosidad plástica se calcula con la siguiente ecuación:

$$PV(cP) = \theta_{600} - \theta_{300} = 80 - 55 = 25$$

El punto cedente o yield point llega a ser  $\tau_o$  de la ecuación de Herschel Bulkley determinada:

$$Yp = \theta_{300} - Vp = 55 - 25$$

$$Yp = 30 \frac{L}{100 ft^2}$$

Los resultados están dentro de los requerimientos de la Tabla 3.10.

### 3.25.3. Determinación de la curva de viscosidad

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{viscosidad (cP)} = 1000 * \frac{\text{esfuerzo de corte } (\tau)}{\text{velocidad de corte } (\gamma)}$$

Donde el esfuerzo de corte:

$$\tau(\text{cP}) = 0.511 * \theta$$

La velocidad de corte:

$$\gamma(1/\text{seg}) = 1.703 * \text{RPM}$$

De las cuales se forma la siguiente tabla 3.71.:

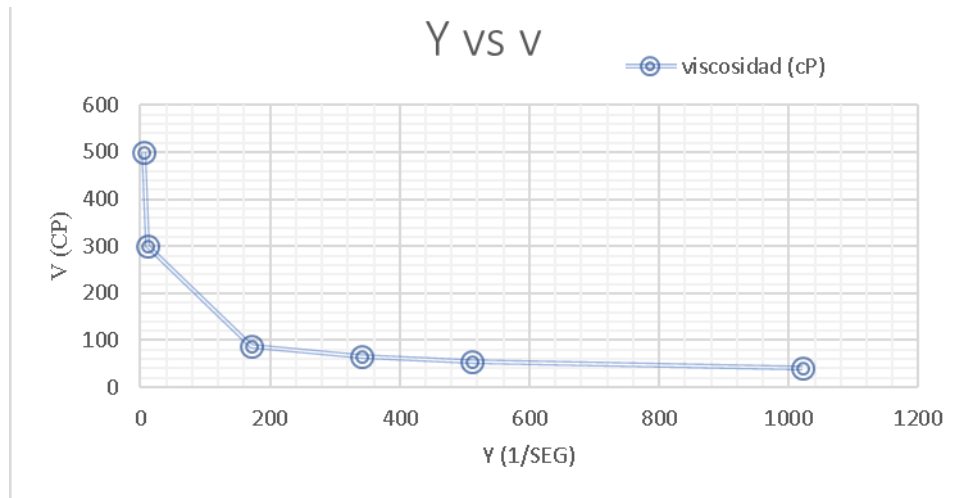
**Tabla 3.72. Determinación de los valores de viscosidad**

<b>Velocidad (RPM)</b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\gamma</math> (1/seg)</b>	<b><math>\tau</math>(cP)</b>	<b>Viscosidad (cP)</b>
600	80	1021.8	40.88	40
300	55	510.9	28.105	55
200	43	340.6	21.97	65
100	29	170.3	14.82	87
6	6	10.22	3.07	300
3	5	5.11	2.55	499

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos se procede a realizar la Figura 3.14. para saber si el fluido realmente se ajusta al modelo que se está buscando de Herschel-Bulkley con la viscosidad:

**Figura 3.32. Grafica de velocidad de corte vs Viscosidad cP**



Fuente: Elaboración propia

La gráfica salió idéntica a la gráfica de la Figura 3.32 que sacó el programa Mudware que ya fue interpretado.

#### **3.25.4. Determinación de la porosidad promedio**

Este valor viene después de extraer el revoque del Filtro API, en el cual se debe medir el espesor con un vernier como se muestra en la Figura 3.33.:

**Figura 3.33. Medición del espesor del revoque con vernier**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.34. se observa el pesaje del papel filtro con el revoque húmedo una vez desprendido del sistema de Filtro API.

**Figura 3.34. Pesaje del revoque húmedo**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.35. se observa el revoque un día después de haber secado a temperatura ambiente, donde también previamente se pesó el papel filtro antes de meter al sistema Filtro API.

**Figura 3.35. Pesaje del revoque seco**



Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido los datos en laboratorio se procede a realizar los cálculos para Porosidad promedio del fluido de perforación a partir de la semilla de chía:

$$\varepsilon = \frac{\frac{m_{wet}}{m_{dry}} - 1}{\frac{m_{wet}}{m_{dry}} - 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s}}$$



Donde:

$m_{wet}$  = Masa del revoque húmedo

$m_{dry}$  = Masa del revoque seco

$\rho_f$  = Densidad del fluido

$\rho_s$  = Densidad promedio de los sólidos en suspensión

Cálculo de la porosidad promedio:

$$m_{\text{papel filtro}} = 0.67 \text{ g}$$

$$m_{\text{papel filtro} + \text{revoque húmedo}} = 11.58 \text{ g}$$

$$e = 0.32 \text{ mm}$$

$$m_{\text{papel filtro} + \text{revoque seco}} = 5.50 \text{ g}$$

Cálculo de  $\rho_s$ :

**Tabla 3.73. Datos de densidad de aditivos**

<i>N°</i>	<i>Aditivo</i>	$\rho(\text{g/ml})$
1	KOH	2.12
2	KCl	1.987
3	Bentonita	2.3
4	CMC	1.8
5	Chía	0.55
6	Barita	4.2
<i>Promedio</i>		2.1

Fuente: Elaboración propia

Calculando la porosidad:

$$m_{wet} = 11.58 - 0.67 = 10.91 \text{ g}$$

$$m_{dry} = 5.50 - 0.67 = 4.83 \text{ g}$$

$$\rho_f = 1.162 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{m_{wet}}{m_{dry}} - 1}{\frac{m_{wet}}{m_{dry}} - 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s}} = \frac{\frac{10.91}{4.83} - 1}{\frac{10.91}{4.83} - 1 + \frac{1.162}{2.1}} = 0.7$$

$$\varepsilon = 0.7$$

El valor de  $\varepsilon$  no debe pasar la unidad, y mientras sea más cerca de 0 significa que el fluido es demasiado viscoso, pero al ser 0.7 es un valor aceptable que representa la impermeabilidad a parte que el volumen de filtrado no sobrepasó los 7 ml que era el límite máximo.

### 3.26. Prueba de funcionalidad del fluido en una muestra arcillosa.

Se tomó dos rocas de la formación arcillosa Petaca que es una muestra tomada en una expedición anterior del área de geología del INSPET en el laboratorio de Geología y Reservorios.

Para analizar las rocas primeramente se pulió con Carbonato de Silice # 80 sobre una superficie de vidrio 800 como se muestra en la Figura 3.36:

**Figura 3.36. Pulido de las rocas**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.37. se muestra las al finalizar el pulido y previamente lavados con abundante agua, donde se nota la superficie lisa de ambas.

**Figura 3.37. Rocas pulidas**



Fuente: Elaboración propia

De la parte NO pulida se decidió extraer pedazos que se dividieron en pequeñas muestras con la Máquina Cortadora como se muestran en la Figura 3.38.:

**Figura 3.38 Máquina cortadora**



Fuente: Elaboración propia

El cortado de la roca debe realizarse con guantes de goma y gafas protectoras como medida de protección personal, la superficie metálica debe contener agua para evitar que las micropartículas de roca provocadas salten y dañen, se debe pasar la roca por el cortador con mucho cuidado como el la Figura 3.39:

**Figura 3.39. Cortado de muestras pequeñas**



Fuente: Elaboración propia

Posterior al corte se recolectaron las pequeñas muestras en cajas petri como se muestra en la Figura 3.40.:

**Figura 3.40. Muestras obtenidas**



Fuente: Elaboración propia

Para hacer las pruebas en las muestras se elaboraron 2 tipos de lodo de la Figura 3.41., uno con chía y otro simple de las cuales se midieron sus respectivos pH:

**Figura 3.41. Lodos para las muestras**



Fuente: Elaboración propia

### **3.26.1. Análisis de las muestras grandes**

El Microscopio binocular de la Figura 3.42. de la marca EURONEX ayudó a obtener capturas de lugares en específico de las rocas en estudio ya que éstas presentan una variedad de colores en su superficie que obviamente representan diferentes tipos de arcillas.

**Figura 3.42. Microscopio Binocular EURONEX**



Fuente: Elaboración propia

Para poder obtener las capturas con el Microscopio de la superficie fija plana de las rocas, se requirió la ayuda de plastilina como se ve en la Figura 3.43.:

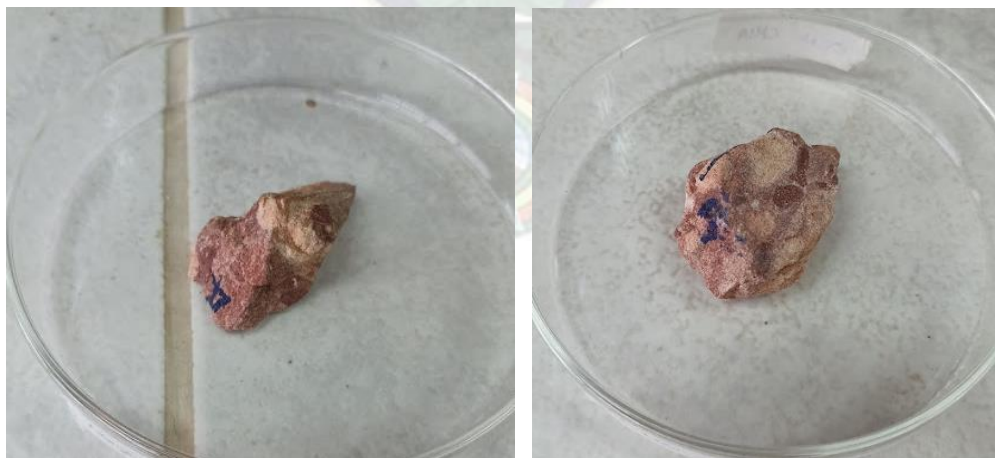
**Figura 3.43. Muestras en físico**



Fuente: Elaboración propia

Las muestras de la Figura 3.44. presentan diferentes formas de arcilla como por ejemplo manchas blancas, rojizas y las manchas guindas, donde las manchas blancas representan a Cherts que son una combinación de arcillas con cuarzo, las rojizas y las guindas son distintos tipos de arcillas, para ello se tomó dos cajas petri de vidrio para hacerlas reposar uno con el lodo a partir de chía y el otro con lodo simple:

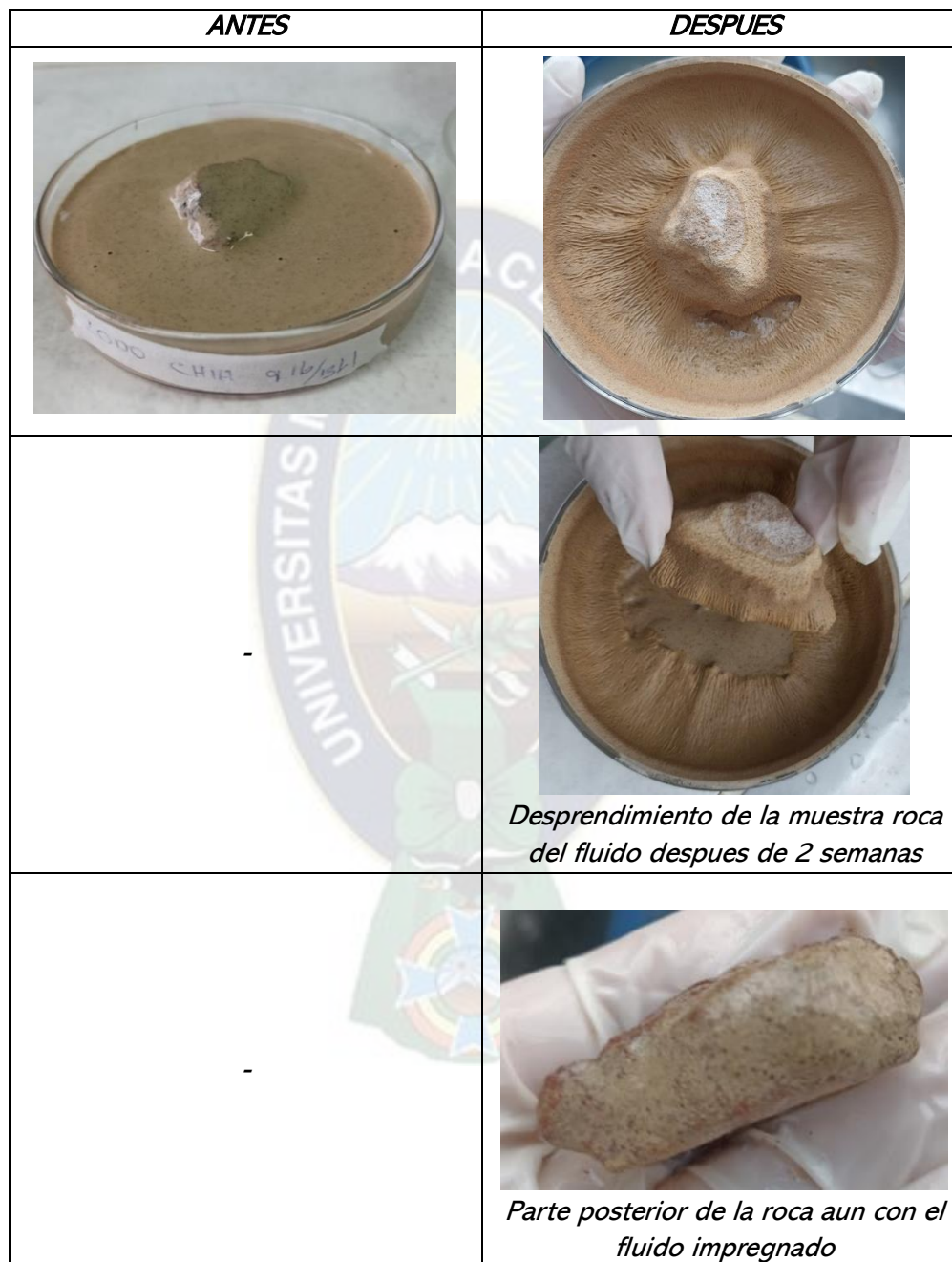
**Figura 3.44. Muestras en cajas de petri**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.45. se muestra una roca antes y después de haberlo hecho reposar con fluido de perforación a partir de la semilla de chía por dos semanas:

**Figura 3.45. Muestra con lodo de chía**

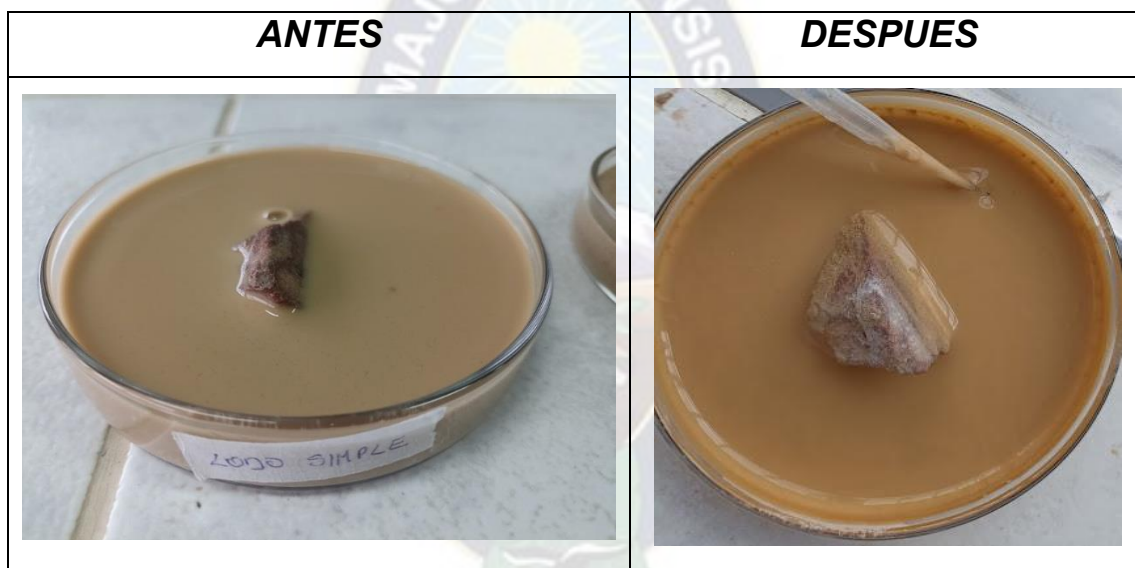


Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la anterior Figura 3.45. la parte que estaba expuesta hacia la superficie con el lodo de chía está seca y es similar a una costra, se formó una superficie seca y rígida lo que indica que en el pozo actuará de la misma forma. La parte inferior aún se mantiene con el lodo húmedo que debido a sus propiedades una película de lodo cubría totalmente a la roca por sus iones de  $K^+$  y  $Mg^{++}$  sin dejarse caer o chorrear, la roca no se desintegró.

Por otro lado, se dejó reposando la otra roca muestra con lodo simple por el lapso de dos semanas, como se muestra en Figura 3.46:

**Figura 3.46. Muestra con lodo simple**



Fuente: Elaboración propia

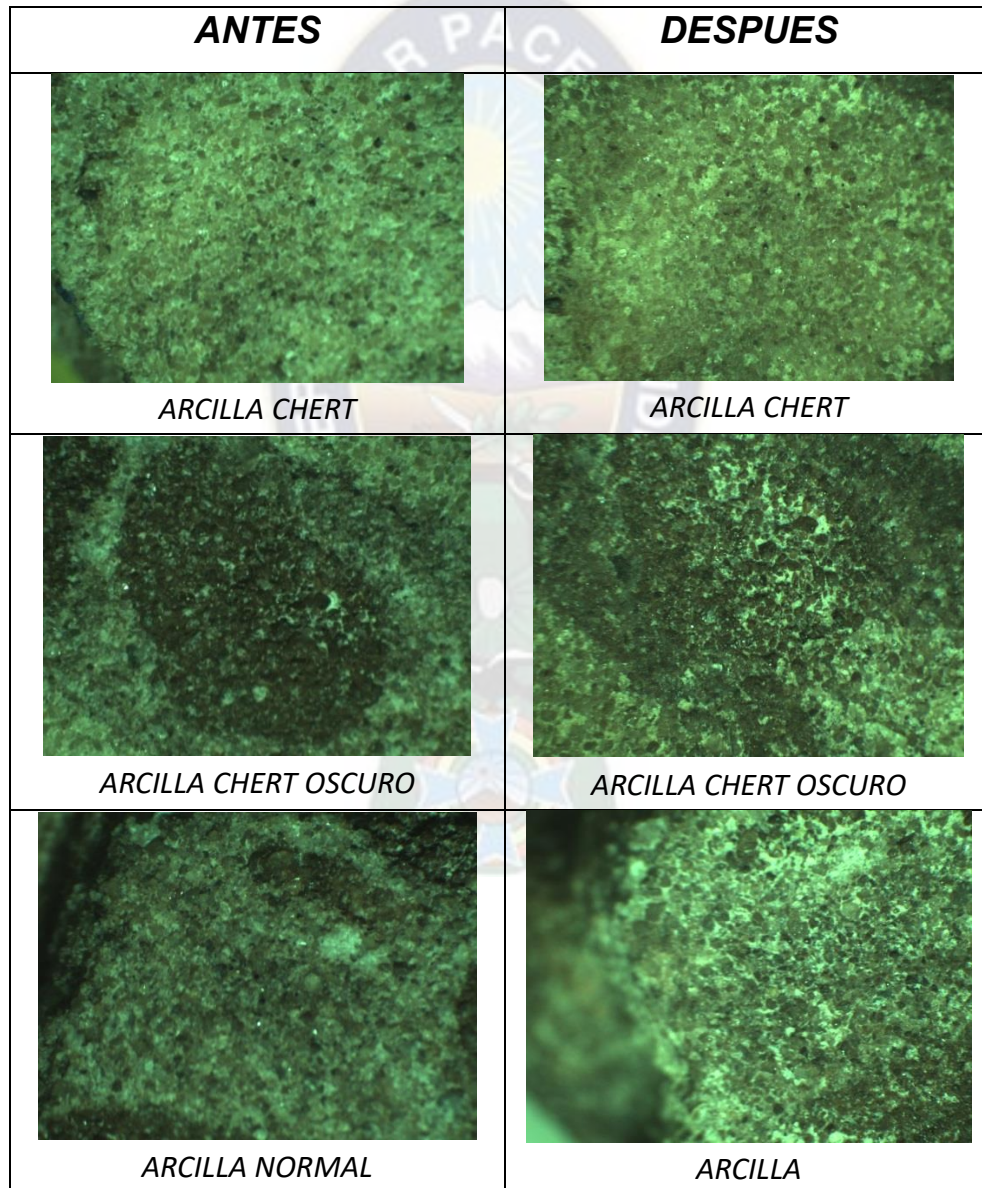
Para el análisis de la Figura 3.45. el lodo simple se secó, quedando un mínimo porcentaje de humedad y no había formado ninguna costra, sino solamente los sólidos precipitados. También se observa que la roca no se desintegró por encima porque el lodo se escurrió precipitándose al principio dejando la parte superior de la muestra libre durante las dos semanas de reposo, en cambio sí se notaron pequeños desprendimientos de la roca en la parte inferior.



### 3.26.1.1. Análisis de las capturas con el microscopio

Se tuvieron que lavar las rocas con abundante agua para que el microscopio pueda captar los cambios de la superficie de la roca. Lavar la roca reposada con lodo simple fue fácil, aunque frágil ya que era propensa a desintegrarse, pero lavar la roca reposada en el lodo de chía fue complicado ya que la película de lodo estaba muy adherida a la superficie de la roca:

Figura 3.47. Capturas en microscopio de la muestra de lodo con chía

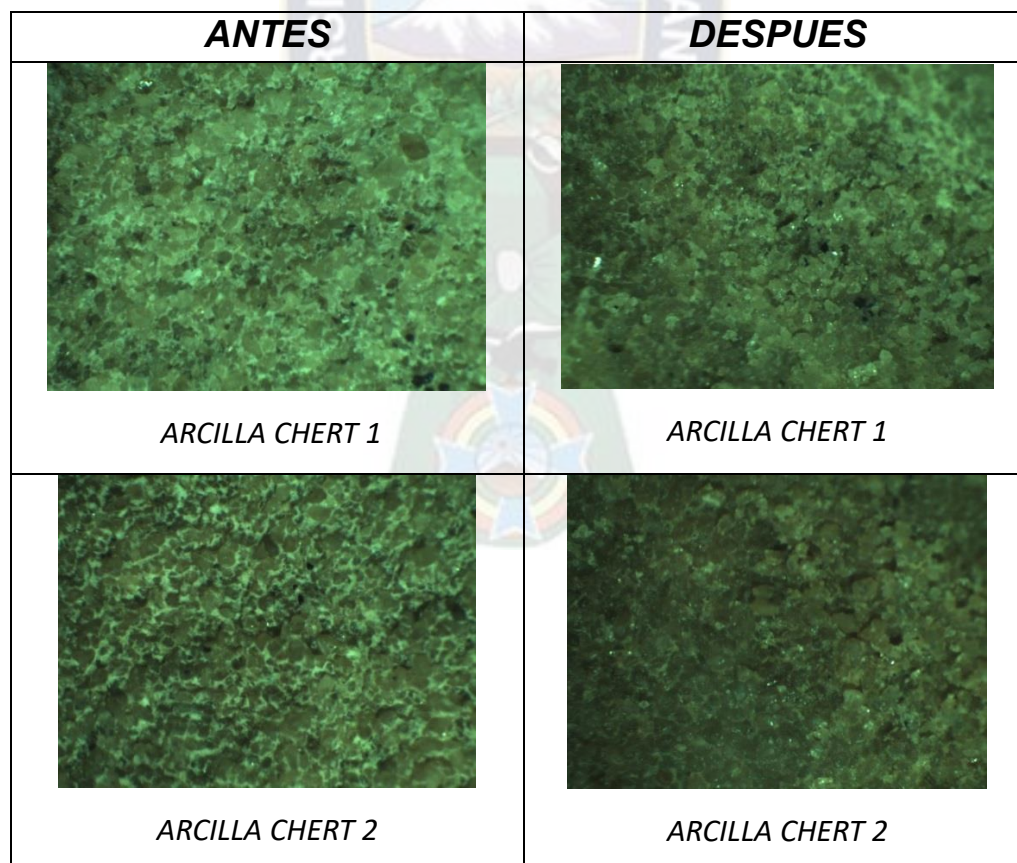


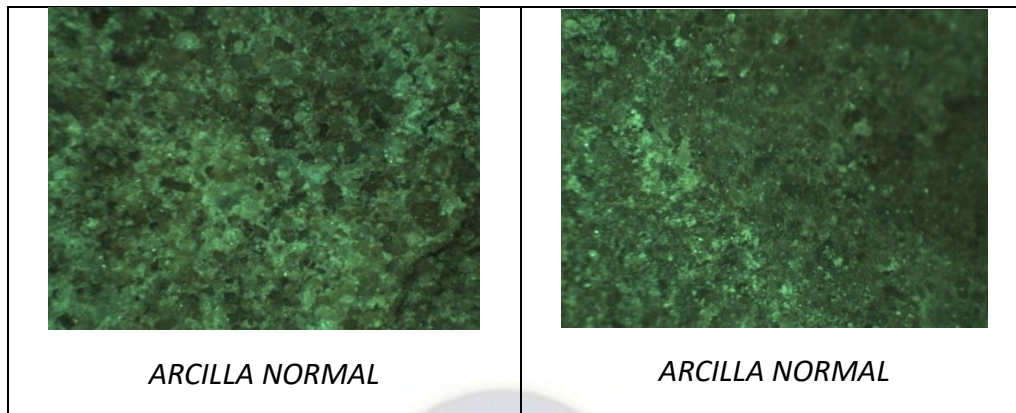
Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la Figura 3.47. se puede observar que la diferencia entre el ANTES y DESPUES son las líneas brillosas presentes entre los granos de la superficie, que representan al lodo de chía seco que se adhirió a la roca que llegan a ser los iones de  $K^+$  y  $Mg^{++}$  adheridos por efecto de adsorción; la roca no tiene rasgos de desprendimiento ya que las manchas se presentan en el mismo lugar y de las mismas dimensiones lo que evidencia que no hubo absorción de líquido por parte de la roca, es decir el lodo a partir de chía cumplió con su funcionamiento.

A continuación, se muestra la Figura 3.48. que son las capturas de la roca reposadas con lodo simple donde se lavó la roca muestra con agua para que el microscopio pueda captar sus cambios, no fue difícil desprender el poco lodo seco adherido, pero fue algo frágil ya que se desprendieron pequeñas partículas.

**Figura 3.48. Capturas en microscopio de la muestra de lodo simple**





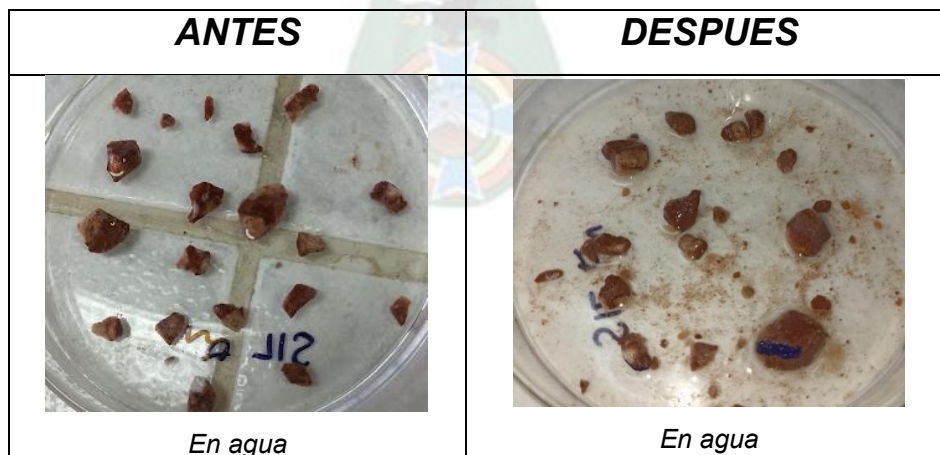
Fuente: Elaboración propia

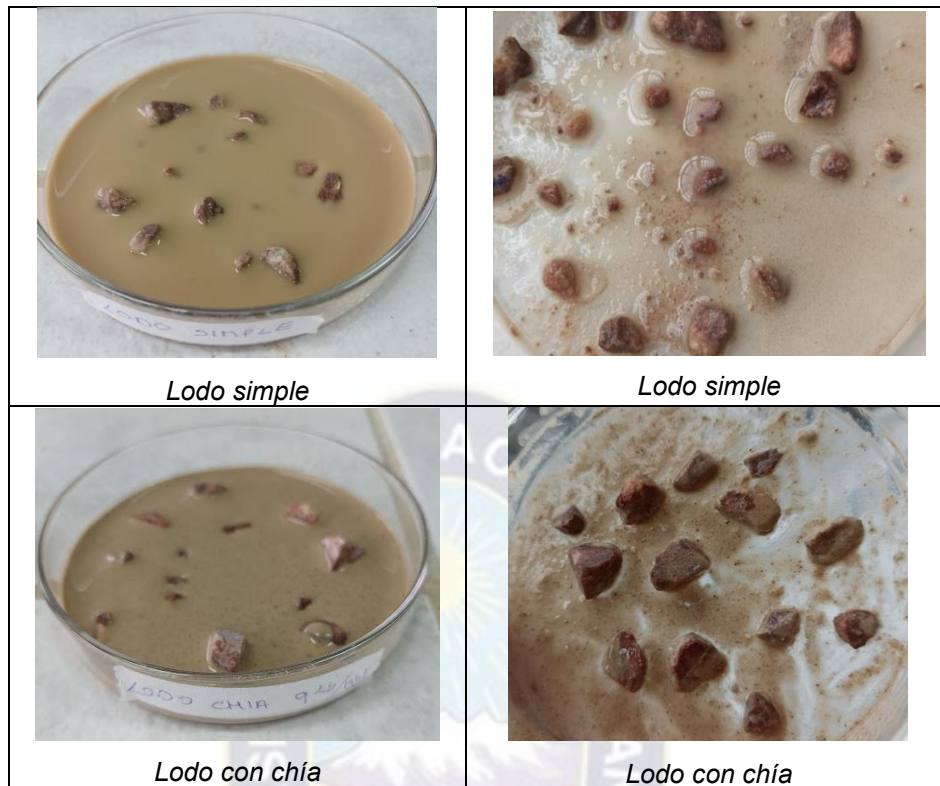
En la Figura 3.48. diferencia entre el ANTES y DESPUES se nota que en un inicio los granos de la roca están marcados y claros, pero después se perdió la visibilidad de los granos ya que la muestra al haber absorbido líquido de lodo por dos semanas está húmeda, también porque al lavar la muestra hubo algunos desprendimientos de partículas y no se observa lodo adherido como en la Figura 3.46.

### 3.26.2. Análisis de las muestras pequeñas

Se pusieron en cajas petri y se las reposaron con agua, lodo simple y con chía como se muestra en la Figura 3.49:

**Figura 3.49. Resultados de reposo después de dos semanas**





Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la Figura 3.49. no se puede comparar al 100% con las condiciones de P y T en un pozo real, pero después de dos semanas de reposo se observó que:

- La roca con agua se desintegró de manera parcial dejando restos de partículas de roca remojada a sus alrededores
- La roca con lodo simple se desintegró parcialmente, debido a que la roca absorbió agua llegando a desintegrarse
- Las rocas reposadas con lodo de chía se mantuvieron cubiertas o impregnadas en toda su superficie por una película espesa de lodo, esto se debe a sus iones de  $K^+$  y  $Mg^{++}$  que reacciona haciendo que estas moléculas se unan con electrones de la roca encapsulándolos y así funcione como una barrera de protección, dejándolas intactas y enteras.

### 3.27. Ventajas y desventajas

**Tabla 3.74. Tabla de ventajas y desventajas**

<i>VENTAJAS</i>	<i>DESVENTAJAS</i>
<i>Fluido de perforación eco amigable</i>	<i>Requiere chía molida</i>
<i>Inhibidor natural de arcillas</i>	<i>Requiere una operación de tamizaje</i>
<i>La chía proporciona propiedades antioxidantes</i>	<i>Riesgo de contaminación por hongos</i>
<i>Viscosificante</i>	<i>No se puede reutilizar</i>
<i>El mucílago de chía emulsiona con los polímeros</i>	<i>Olor desagradable</i>

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Este proyecto va enfocado para empresas que dan el servicio de elaboración fluidos de perforación en general, es decir, que ya cuentan con los insumos en general como aditivos, maquinarias, energía, hidratación y personal capacitado, donde se propone implementar este nuevo tipo de fluido donde sólo se requerirá obtener la semilla de chía molida, por lo que se realizará el cálculo de Porcentaje de ahorro, Costo/Beneficio y **no** así del VAN, TIR ya que estos términos se consideran para un proyecto de inversión en general desde cero tomando en cuenta que para un pozo se necesitan al menos tres tipos de fluidos que también deben ser analizados por la empresa que brinda este servicio.

Este proyecto estudia demostrar mediante la comparación de costos que el fluido de perforación a partir de la semilla de chía es más económico que un fluido de perforación con inhibidor de arcillas químico que ya existe en el mercado petrolero.

### **4.1. Masas de aditivos por Bbl de lodo a partir de chía.**

El análisis económico será tomando en cuenta como un nuevo tipo de fluido de perforación en base a chía para la empresa que da el servicio de elaboración de fluidos a la estatal YPFB.

La décimo tercera y la décimo cuarta prueba con 9 y 10 de concentración cumplen con los requisitos, pero la prueba de concentración 10 requiere mayor masa de chía y bentonita lo que lo hace un producto más caro, es por eso que se considera únicamente la prueba de concentración 9 por requerir menos masa de aditivos:

**Tabla 4.1. Volúmenes del lodo a partir de chía de concentración 9**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>V (ml)</i>	<i>%v/v</i>
1	<i>KOH</i>	<i>0.472</i>	<i>0.135</i>
2	<i>KCl</i>	<i>5.033</i>	<i>1.438</i>
3	<i>Bentonita</i>	<i>4.35</i>	<i>1.243</i>
4	<i>CMC</i>	<i>0.56</i>	<i>0.16</i>
5	<i>Chía</i>	<i>16.36</i>	<i>4.674</i>
6	<i>Barita</i>	<i>16.4</i>	<i>4.686</i>
7	<i>Agua</i>	<i>306.83</i>	<i>87.664</i>
	$\Sigma$	<i>350 ml</i>	<i>100</i>

Fuente: Elaboración propia

Calculo para 1 Bbl de fluido de perforación base chía:

$$1\text{Bbl} = 159 \text{ litros}$$

$$V_{KOH} = 159 \text{ litros} * \frac{0.135\%}{100\%} = 0.215 \text{ litros}$$

$$V_{KCl} = 159 \text{ litros} * \frac{1.438\%}{100\%} = 2.286 \text{ litros}$$

$$V_{Bentonita} = 159 \text{ litros} * \frac{1.243\%}{100\%} = 1.976 \text{ litros}$$

$$V_{CMC} = 159 \text{ litros} * \frac{0.16\%}{100\%} = 0.254 \text{ litros}$$

$$V_{CHIA} = 159 \text{ litros} * \frac{4.674\%}{100\%} = 7.432 \text{ litros}$$

$$V_{Barita} = 159 \text{ litros} * \frac{4.686\%}{100\%} = 7.451 \text{ litros}$$

$$V_{H2O} = 159 \text{ litros} * \frac{87.664\%}{100\%} = 139.386 \text{ litros}$$

Fórmula para el cálculo de masa de los aditivos a partir del volumen para un barril de fluido de perforación base chía:

$$X \text{ litros} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ litro}} * \frac{Y \text{ g}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = XY \text{ Kg}$$

A continuación, se realizará el cálculo de la masa en Kg en la Tabla 4.2 ajustando el valor del volumen a un decimal superior en 1 debido a que es mejor calcular mayor cantidad de lodo ya que se perderá masa en las mermas de la elaboración de este fluido.

**Tabla 4.2. Cálculo de las masas en Kg**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>V (litros)</i>	<i>V (litros) 1 decimal</i>	<i>ρ(g/ml)</i>	<i>masa (Kg)</i>
1	<i>KOH</i>	<i>0.215</i>	<i>0.3</i>	<i>2.12</i>	<i>0.6</i>
2	<i>KCl</i>	<i>2.286</i>	<i>2.4</i>	<i>1.987</i>	<i>4.8</i>
3	<i>Bentonita</i>	<i>1.976</i>	<i>2.0</i>	<i>2.3</i>	<i>4.6</i>
4	<i>CMC</i>	<i>0.254</i>	<i>0.3</i>	<i>1.8</i>	<i>0.5</i>
5	<i>Chía</i>	<i>7.432</i>	<i>7.5</i>	<i>0.55</i>	<i>4.1</i>
6	<i>Barita</i>	<i>7.451</i>	<i>7.5</i>	<i>4.2</i>	<i>31.5</i>
7	<i>Agua</i>	<i>139.386</i>	<i>139.5</i>	<i>1</i>	<i>139.5</i>
	<i>Σ</i>	<i>159</i>			

Fuente: Elaboración propia

#### **4.2. Masas de aditivos por Bbl de lodo con inhibidor de arcillas comercial**

Según la hoja técnica que se encuentra en el ANEXO I del inhibidor de arcillas comercial CCDC-XCS III el lodo debe tener 5 % en volumen de este aditivo que tiene las siguientes características de la Tabla 4.3.:



**Tabla 4.3. Propiedades del controlador de arcillas comercial**

<b>APARIENCIA</b>	<b>LÍQUIDO CLARO</b>
<b>Gravedad específica</b>	<b>1.02</b>
<b>pH</b>	<b>6.25</b>
<b>Solubilidad</b>	<b>Soluble en agua</b>
<b>Viscosidad</b>	<b>3cp</b>
<b>Punto cedente</b>	<b>3 lb/pie2</b>

Fuente: Elaboración propia

Para una formulación de 350ml el 5% en volumen son 17.5 ml de CCDC-XCS III que llegaría a ser en masa:

$$m_{CCDC\ XCS\ III} = V * \rho = 17.5\ ml * 1.02\ \frac{g}{ml}$$

$$m_{CCDC\ XCS\ III} = 17.85\ g$$

Donde la masa por demostración de ecuaciones llega a ser igual a la concentración que debe tener el lodo.

Se calcula en la Tabla 4.4 las masas en base a lo que indica en su ficha técnica y tomando en cuenta que este lodo tiene Goma Xantana:

**Tabla 4.4. Concentración lodo con inhibidor de arcillas comercial**

<b>Nº</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Concentración (lb/Bbl)</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
1	KOH	1	2.12
2	KCl	10	1.987
3	Bentonita	10	2.3
4	GX	1	1.5
5	CMC	1	1.8
6	CCDC-XCS III	17.85	1.02
7	Barita	-	4.2
8	Agua	-	1

Fuente: Elaboración propia

$V_f=350$  ml

$d_f= 9.7$  LPG = 9.7 lb/gal (Densidad teórica)

$$9.7 \frac{lb}{gal} * \frac{453.6 g}{1 lb} * \frac{1 gal}{3.785 l} * \frac{1 l}{1000 ml} = 1.162 \frac{g}{ml}$$

Habiendo demostrado que los valores de concentración son igual a los valores de masa en g, calcularemos los volúmenes de cada uno de los aditivos:

$$V_{KOH} = \frac{1 g}{2.12 g/ml} = 0.472 ml$$

$$V_{KCl} = \frac{10 g}{1.987 g/ml} = 5.033 ml$$

$$V_{Bentonita} = \frac{10 g}{2.3 g/ml} = 4.35 ml$$

$$V_{GX} = \frac{1 g}{1.5 g/ml} = 0.67 ml$$

$$V_{CMC} = \frac{1 g}{1.8 g/ml} = 0.56 ml$$

$$V_{CCDC-XCS III} = \frac{17.85 g}{1.02 g/ml} = 17.5 ml$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia volumétrica:

$$V_f = V_{KOH} + V_{KCl} + V_{Bentonita} + V_{GX} + V_{CMC} + V_{CCDC-XCS III} + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$350 = 0.472 + 5.033 + 4.35 + 0.67 + 0.56 + 17.5 + V_{Barita} + V_{H_2O}$$

$$V_{Barita} = 321.415 - V_{H_2O}$$

Reemplazando en la ecuación de conservación de materia másica:

$$\rho_f * V_f = \rho_{KOH} * V_{KOH} + \rho_{KCl} * V_{KCl} + \rho_{Bent} * V_{Bent} + \rho_{GX} * V_{GX} + \rho_{CMC} * V_{CMC} \\ + \rho_{CCDC-XCS III} * V_{CCDC-XCS III} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = m_{KOH} + m_{KCl} + m_{Bent} + m_{GX} + m_{CMC} + m_{CCDC-XCS III} + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + 17.85 + \rho_{Bar} * V_{Bar} + \rho_{H_2O} * V_{H_2O}$$

$$350 * 1.162 = 1 + 10 + 10 + 1 + 1 + 17.85 + [4.2 * (321.415 - V_{H_2O})] + 1 * V_{H_2O}$$

$$365.85 = 1349.943 - 4.2V_{H_2O} + V_{H_2O}$$

$$3.2V_{H_2O} = 984.1$$

$$V_{H_2O} = 307.53 \text{ ml}$$

$$V_{Barita} = 321.415 - 307.53 = 13.9 \text{ ml}$$

A continuación, en las Tablas 4.5. y Tabla 4.6. se calcula las masas para 350 ml y su porcentaje en volumen:

**Tabla 4.5. Cálculo de masas para la primera prueba**

Nº	Aditivo	V (ml) * ρ(g/ml)	Masa (g)
1	KOH	0.472 * 2.12	1
2	KCl	5.033 * 1.987	10
3	Bentonita	4.35 * 2.3	10
4	GX	0.67 * 1.5	1
5	CMC	0.56 * 1.8	1
6	CCDC-XCS III	17.5 * 1.02	17.85
7	Barita	13.9 * 4.2	58.38
8	Agua	307.53 * 1	307.53

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.6. Porcentaje en volumen**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>V (ml)</i>	<i>%v/v</i>
1	<i>KOH</i>	0.472	0.135
2	<i>KCl</i>	5.033	1.438
3	<i>Bentonita</i>	4.35	1.243
4	<i>GX</i>	0.67	0.191
5	<i>CMC</i>	0.56	0.16
6	<i>CCDC-XCS III</i>	17.5	5
7	<i>Barita</i>	13.9	3.971
8	<i>Agua</i>	307.53	87.866
	$\Sigma$	350 ml	100

Fuente: Elaboración propia

Cálculo para 1 Bbl de fluido de perforación base chía:

$$1\text{Bbl} = 159 \text{ litros}$$

$$V_{KOH} = 159 \text{ litros} * \frac{0.135\%}{100\%} = 0.215 \text{ litros}$$

$$V_{KCl} = 159 \text{ litros} * \frac{1.438\%}{100\%} = 2.286 \text{ litros}$$

$$V_{Bentonita} = 159 \text{ litros} * \frac{1.243\%}{100\%} = 1.976 \text{ litros}$$

$$V_{GX} = 159 \text{ litros} * \frac{0.191\%}{100\%} = 0.304 \text{ litros}$$

$$V_{CMC} = 159 \text{ litros} * \frac{0.16\%}{100\%} = 0.254 \text{ litros}$$

$$V_{CCDC-XCS III} = 159 \text{ litros} * \frac{5\%}{100\%} = 7.95 \text{ litros}$$

$$V_{Barita} = 159 \text{ litros} * \frac{3.971\%}{100\%} = 6.314 \text{ litros}$$

$$V_{H_2O} = 159 \text{ litros} * \frac{87.866\%}{100\%} = 139.707 \text{ litros}$$

Fórmula para el cálculo de masa de los aditivos a partir del volumen para un barril de fluido de perforación base chía:

$$X \text{ litros} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ litro}} * \frac{Y \text{ g}}{\text{ml}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = XY \text{ Kg}$$

A continuación, se realiza el cálculo de la masa en Kg ajustando el valor del volumen a un decimal superior en 1 debido a que es mejor calcular mayor cantidad de lodo ya que se pierde masa en las mermas de la elaboración de este fluido.

**Tabla 4.7. Cálculo de las masas en Kg**

Nº	Aditivo	V (litros)	V (litros) 1 decimal	$\rho$ (g/ml)	masa (Kg)
1	KOH	0.215	0.3	2.12	0.6
2	KCl	2.286	2.4	1.987	4.8
3	Bentonita	1.976	2.0	2.3	4.6
4	GX	0.304	0.4	1.5	0.6
5	CMC	0.254	0.3	1.8	0.5
6	CCDC-XCS III	7.95	8	1.02	8.2
7	Barita	6.314	6.4	4.2	26.9
8	Agua	139.707	139.9	1	139.9
	$\Sigma$	159			

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3. Precios de los aditivos para un lodo a nivel internacional

Investigando en la web y considerando que el precio del agua es 10 bs por m<sup>3</sup>, se realiza la siguiente conversión:

$$\text{Precio H}_2\text{O} = \frac{10 \text{ Bs}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ Sus}}{6.9 \text{ Bs}} = 1.43 \frac{\text{\$us}}{\text{m}^3}$$

**Tabla 4.8. Precios de los aditivos investigados**

<i>Nº</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Precio (USD/Kg)</i>
1	<i>KOH</i>	<i>7.45</i>
2	<i>KCl</i>	<i>33.33</i>
3	<i>Bentonita</i>	<i>0.7</i>
4	<i>GX</i>	<i>16</i>
5	<i>CMC</i>	<i>2</i>
6	<i>CCDC-XCS III</i>	<i>7.5</i>
7	<i>Barita</i>	<i>9.3</i>
8	<i>Chía</i>	<i>4.5</i>
9	<i>Agua</i>	<i>1.43/m3</i>

Fuente: QuimiNet

#### 4.4. Volumen de lodo para formaciones arcillosas del Boomerang Hills

Según la información del punto 3.4.1.

**Tabla 4.9. Propiedades de los fluidos en los tres campos**

<i>POZO</i>	<i>Vol. (Bbl)</i>
<i>VBR – 34D</i>	<i>1754</i>
<i>BQN - NX3</i>	<i>2700</i>
<i>YPC – 41D</i>	<i>1700</i>

Fuente: Elaboración propia

Considerando que los valores de los tres pozos en distintos sectores del Boomerang Hills son similares, se tomó en cuenta la media aritmética de los volúmenes necesarios:

$$V_{PROM} = \frac{1754 + 2700 + 1700}{3} = 2051.3 \cong 2052 \text{ Bbl}$$

$$V_{PROM} = 2052 \text{ Bbl}$$

Se necesita aproximadamente 2052 Bbl de lodo para perforar la sección de arcillas en el Boomerang Hills.

#### 4.5. Costo del fluido de perforación a partir de chía

Debido a que claramente las masas de los reactivos de esta prueba son mayores a la décimo tercera prueba donde se usa 9 g, se tomará en cuenta solamente la décimo tercera prueba para el análisis económico como propuesta principal para que el lodo escogido sea rentable.

**Tabla 4.10. Datos de cantidades máxicas y volumétricas de lodo con chía**

N°	Aditivo	V (litros)	Masa (Kg)
1	KOH	0.3	0.6
2	KCl	2.4	4.8
3	Bentonita	2.0	4.6
4	CMC	0.3	0.5
5	Chía	7.5	4.1
6	Barita	7.5	31.5
7	Agua	139.5	139.5

Fuente: Elaboración propia

Cálculo uno por uno:

$$USD_{KOH} = 0.6 \text{ Kg} * \frac{7.45 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 4.47 \text{ USD}$$

$$USD_{KCl} = 4.8 \text{ Kg} * \frac{33.33 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 160 \text{ USD}$$

$$USD_{Bentonita} = 4.6 \text{ Kg} * \frac{0.7 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 3.22 \text{ USD}$$

$$USD_{CMC} = 0.5 \text{ Kg} * \frac{2 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 1 \text{ USD}$$

$$USD_{CHIA} = 4.1 \text{ Kg} * \frac{4.5 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 18.45 \text{ USD}$$

$$USD_{Barita} = 31.5 \text{ Kg} * \frac{9.3 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 293 \text{ USD}$$

$$USD_{H2O} = 139.5 \text{ litros} * \frac{1m^3}{1000 \text{ litros}} * \frac{1.43 \text{ USD}}{m^3} = 0.2 \text{ USD}$$

$$Precio_{Bbl \text{ lodo con chía}} = 4.47 + 160 + 3.22 + 1 + 18.45 + 293 + 0.2$$

$$Precio_{Bbl \text{ lodo con chía}} = 480.34 \frac{USD}{Bbl}$$

Calculando para el volumen total de lodo de perforación a partir de chía:

$$Costo_{vol \text{ total}} = 2052 \text{ Bbl} * \frac{480.34 \text{ USD}}{Bbl}$$

$$Costo_{vol \text{ total}} = 985657.68 \text{ USD}$$

#### 4.6. Costo del fluido de perforación con inhibidor de arcillas comercial

Cálculo de lodo con inhibidor de arcilla comercial.

**Tabla 4.11. Cantidades máxicas y volumétricas de lodo simple**

Nº	Aditivo	V (litros)	Masa (Kg)
1	KOH	0.3	0.6
2	KCl	2.4	4.8
3	Bentonita	2.0	4.6
4	GX	0.4	0.6
5	CMC	0.3	0.5
6	CCDC-XCS III	8	8.2
7	Barita	6.4	26.9
8	Agua	139.9	139.9

Fuente: Elaboración propia

Cálculo uno por uno:

$$USD_{KOH} = 0.6 \text{ Kg} * \frac{7.45 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 4.47 \text{ USD}$$

$$USD_{KCl} = 4.8 \text{ Kg} * \frac{33.33 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 160 \text{ USD}$$

$$USD_{Bentonita} = 4.6 \text{ Kg} * \frac{0.7 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 3.22 \text{ USD}$$



$$USD_{GX} = 0.6 \text{ Kg} * \frac{16 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 9.6 \text{ USD}$$

$$USD_{CMC} = 0.5 \text{ Kg} * \frac{2 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 1 \text{ USD}$$

$$USD_{CCDC-XCS III} = 8.2 \text{ Kg} * \frac{7.5 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 61.5 \text{ USD}$$

$$USD_{Barita} = 26.9 \text{ Kg} * \frac{9.3 \text{ USD}}{\text{Kg}} = 250.2 \text{ USD}$$

$$USD_{H2O} = 140 \text{ litros} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} * \frac{1.43 \text{ USD}}{\text{m}^3} = 0.2 \text{ USD}$$

$$Precio_{Bbl \text{ lodo con chía}} = 4.47 + 160 + 3.22 + 9.6 + 1 + 61.5 + 250.2 + 0.2$$

$$Precio_{Bbl \text{ lodo con chía}} = 490.2 \frac{\text{USD}}{\text{Bbl}}$$

Calculando para el volumen total de lodo de perforación a partir de chía:

$$Costo_{Vol \text{ total}} = 2052 \text{ Bbl} * \frac{490.2 \text{ USD}}{\text{Bbl}}$$

$$Costo_{Vol \text{ total}} = 1005890.4 \text{ USD}$$

#### 4.7. Monto de ahorro

Para el porcentaje de ahorro se considera el costo del Fluido de perforación a partir de chía y el costo de Fluido con inhibidor de arcillas comercial.

$$USD \text{ AHORRADOS} = Costo_{Vol \text{ total}} \text{ inhibidor comercial} - Costo_{Vol \text{ total}} \text{ chía}$$

$$USD \text{ AHORRADOS} = 1005890.4 \text{ USD} - 985657.68 \text{ USD} = 20232.72 \text{ USD}$$

$$\% \text{ Ahorro} = 20232.72 \text{ USD} * \frac{100 \%}{1005890.4 \text{ USD}} = 2.01 \%$$

Reemplazando en la ecuación de monto de ahorro:

$$Monto \text{ de Ahorro} = 1005890.4 \text{ USD} * 2.01 \% = 20218.4 \text{ USD}$$

$$Monto \text{ de Ahorro} = 20218.4 \text{ USD}$$

#### 4.8. Análisis Beneficio/Costo

Para el análisis del Beneficio/Costo se necesita tener un dato de Tasa de descuento por al menos del 12%, también se debe considerar que para la aplicación del uso de cualquier fluido de perforación debe realizarse en un promedio de 250 días programados, por lo que, los cálculos se presentan en la Tabla 4.12.:

**Tabla 4.12. Cálculos para relación B/C**

<i>Tiempo de operación (Días)</i>	<i>Costo total USD</i>	<i>Beneficios totales USD</i>	<i>Factor de actualización 12%</i>	<i>Costos actualizados USD</i>	<i>Beneficios actualizados USD</i>	<i>Flujo neto de efectivo actual USD</i>
0	20218.4	0	1	20218.4	0	-20218.4
250	0	985657.68	0.892857	0	88005.136	88005.136
<i>Total</i>	20218.4	985657.68		20218.4	88005.136	67786.73

Considerando:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios actualizados}}{\text{Costos actualizados}}$$

$$\frac{B}{C} = \frac{88005.136 \text{ USD}}{20218.4 \text{ USD}} = 4.35$$

Si  $B/C > 1$ , esto indica que los beneficios son mayores a los costos. En consecuencia, el proyecto debe ser considerado.

$B/C = 1$ : significa que no hay ni ganancias ni pérdidas, ya que uno absorbe al otro, así el proyecto no es viable.

$B/C < 1$ : indica que los costos sobrepasan a los beneficios por lo que el proyecto no es rentable.

$$\frac{B}{C} = 4.35$$

Proyecto **ACEPTABLE**

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se logró formular un fluido de perforación que cumple con todos los requerimientos de los pozos en el área del Boomerang Hills eco amigable comparado con un fluido que contiene únicamente químicos.
- Se logró definir un flujograma descrito en el punto 3.5 en laboratorio para la elaboración de un fluido de perforación de calidad sin sólidos en suspensión, sin grumos, sin pérdidas de masa.
- El mucílago de chía emulsiona satisfactoriamente con los polímeros dando lugar a un proceso de elaboración más continuo y uniforme.
- La roca **no** presentó alteraciones producto de reacciones en su superficie por el contacto prolongado con el fluido a partir de la semilla de chía, más al contrario el fluido protegió a la roca.
- El mucílago de chía es un buen Viscosificante por lo que no hubo la necesidad de usar Goma Xantana en su formulación.
- El fluido se analizó con el programa Mudware donde se acomodó satisfactoriamente al modelo Herschel Bulkley, demostrando sus características acertadas para un fluido de perforación.
- Se evidenció la efectividad de este fluido en rocas arcillosas por la película brillante que se ve entre los granos de esta roca por el microscopio, que es el fluido de chía acumulado debido a sus propiedades mineralógicas como ser los iones de  $K^+$  y  $Mg^{++}$  que funcionan como una barrera protectora a la formación, claramente en campo las condiciones de presión y temperatura cambian es por esa razón que hubo la necesidad de esperar 2 semanas para ver la reacción de la roca arcillosa.
- Se obtuvo dos pruebas satisfactorias una con 9 g de chía y otra con 10g, de las cuales el fluido de 9 g de chía fue la seleccionada debido a que necesita menos masa de aditivos, donde se lograría ahorrar.

- Se demostró que el proyecto es factible debido al valor del porcentaje de ahorro ya que al usar un producto comercial de origen químico como inhibidor de arcillas comercial resulta más caro, es decir, genera más gastos que el fluido de perforación base agua a partir de chía.
- El cálculo Beneficio/Costo resultó ser mayor a uno lo que significa que el proyecto es **aceptable**.
- En el área personal se fueron mejorando los métodos técnicos de laboratorio, tanto en el manejo de los equipos, en su limpieza y protección personal ya que el fluido de perforación es un producto peligroso si no se lo maneja con las protecciones adecuadas.
- El fluido al ser básico permite que se mitigue problemas de corrosión en la tubería, pero al contener chía lo aun aún más antioxidante y beneficioso para las tuberías de perforación.

## 5.2. Recomendaciones

- Usar protección personal al momento de elaborar este fluido de perforación ya que se manejan químicos muy corrosivos como el KOH.
- Limpiar, secar y desinfectar cada uno de los materiales y equipos antes y después de su uso.
- Cuidar los predios de laboratorio de Fluido de perforación ya que los equipos son de gran importancia.
- Los equipos del laboratorio pueden realizar un aporte significativo al análisis del uso de fluidos de perforación para pozos gasíferos a nivel nacional.
- Hubo algunas pruebas como el análisis de hinchamiento lineal que faltaron, lo que se recomienda equipar el laboratorio para un análisis más profundo.
- Adquirir químicos para el análisis químico como las pruebas de viraje que actualmente se están desarrollando en otros países.

- Mantener los tamices limpios en laboratorio ya que al estar en la intemperie se encontraban sucios, también hay tamices dañados que necesitan mantenimiento.
- Calibrar todas las balanzas de lodo ya que la mayoría se encuentran sin uso y descalibradas.
- Incentivar al uso del laboratorio ya que hay varios equipos como el mixer múltiple sin uso.
- Se puede considerar el uso de conservantes para el uso de un fluido que contenga un producto orgánico.



## **BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA**

API. (2014). Manual de Fluidos de Perforación, Procedimientos Estándar para la Prueba de Fluidos de Perforación. Dallas, Texas.

Romai, Y. (2008). Fluidos de perforación. México.

Schlumberger (2015). Introducción a los fluidos de perforación. México.

Sierra, M. A., Salazar, G. J. (1999). Principales tipos de lodos empleados en la perforación de pozos de gas, aceite o agua, Boletín de Ciencias de la Tierra.

Bedoya, G. L. (2018). Obtención de un inhibidor de arcillas PHPA (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) para fluidos de perforación base agua a partir de la semilla de chía (salvia hispanica L.) tamizada con malla 200. Trabajo previo a la obtención del título de ingeniero en petróleos. UTE Ecuador

Oscar, L. L. C., Henao, A.M. (2021). Evaluación de un recubrimiento orgánico a base del extracto antioxidante de la semilla de chía para tuberías de transporte de agua de producción petrolera. Programa ingeniería química e ingeniería de petróleos. Bogotá D.C.

Hernande, R. J. (2016). Manual teórico- práctico para el conocimiento, evaluación y selección de fluidos de perforación empleados en la construcción de pozos. División de Ingeniería de Ciencias de la Tierra, Departamento de Ingeniería Petrolera.

ANDINA S.A. (2008). Programa de perforación pozo VBR-34(D), Área de contrato Víbora.

ANDINA S.A. (2016). Programa de perforación pozo Boquerón – Norte X3, BQN-NX3, Área de contrato Boquerón.

ANDINA S.A. (2015). Proyecto de perforación pozo YPC-41D, Área de contrato Yapacaní.

Wikipedia la enciclopedia libre (Actualizado 2022). Salvia hispánica.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Salvia\\_hispanica](https://es.wikipedia.org/wiki/Salvia_hispanica).

Wikipedia la enciclopedia libre (Actualizado 2021). Mucílago.  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Mucílago>

Moreu, B, M. C. (2015). La semilla de chía, información práctica para su consumo.  
<https://www.lechepuleva.es/nutricion-y-bienestar/la-semilla-de-chia>.

TECFRESH, (2014). Tamiz malla n° 40, 425µm ASTM de 8" latón/acero inoxidable altura completa. <https://tecfresh.com/producto/tamiz-malla-n-40>.

TECFRESH, (2015). Tamiz malla n° 100, (150µm) de 8" de acero Inox latón/acero inoxidable altura completa. <https://tecfresh.com/producto/tamiz-malla-n-100>

Noam, K. (Actualizado 2022), Arcillas activadas. QuimiNet  
<https://www.quiminet.com/productos/arcillas-activadas>

Orgánico Natural (2018). Goma Xantana detalles.  
<https://sumerlabs.com/catalogo/organicnaturalshopbolivia/producto/goma-xantana>

Capitani, M. I. (2013). Caracterización y funcionalidad de subproductos de chía (salvia hispánica. I.) aplicación en tecnología de alimentos. Universidad Nacional De La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/>

## ANEXOS.

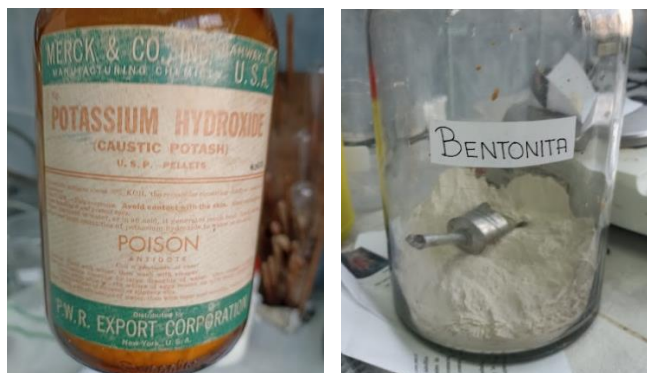
### ANEXO A: Aditivos usados en laboratorio

Figura A.1. Carboximetilcelulosa y Goma Xantana en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Figura A.2. Hidróxido de potasio y Bentonita en laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Figura A.3. Bentonita, Cloruro de potasio y Chía en laboratorio

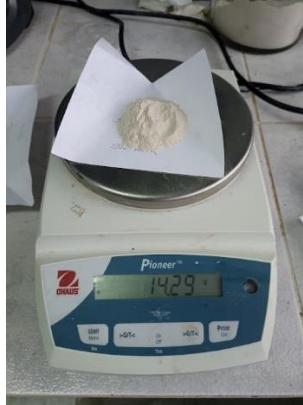


Fuente: Elaboración propia



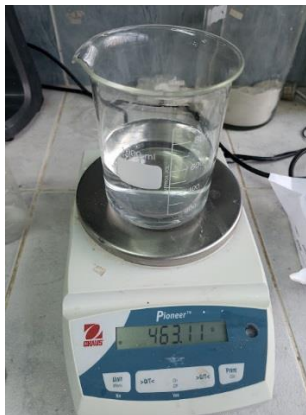
## ANEXO B: Equipos e imágenes de elaboración de lodo

**Figura B.1. Pesaje de los aditivos en balanza precisa**



Fuente: Elaboración propia

**Figura B.2. Pesaje del agua en balanza precisa**



Fuente: Elaboración propia

**Figura B.3. Agitador o mixer de acero inoxidable con disco dispersor**



Fuente: Elaboración propia

**Figura B.4. Mezclado de los aditivos**



Fuente: Elaboración propia

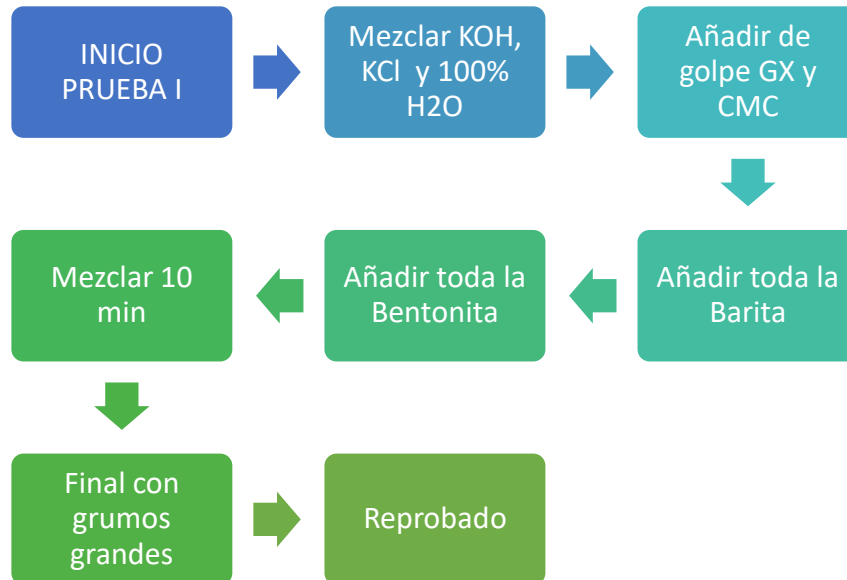
**Figura B.5. Obtención del lodo final**



Fuente: Elaboración propia

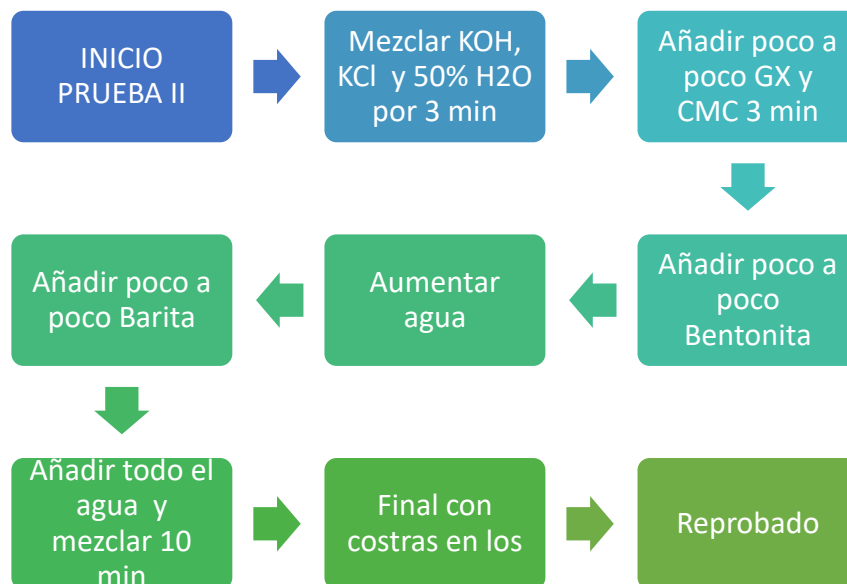
## ANEXO C: Determinación de flujograma de elaboración del lodo

Figura C.1. Determinación de flujograma I



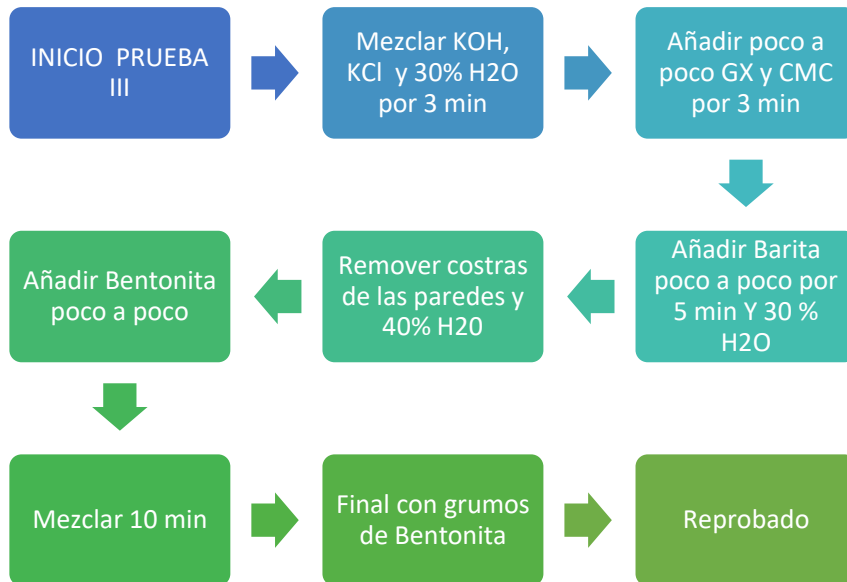
Fuente: Elaboración propia

Figura C.2. Determinación de flujograma II



Fuente: Elaboración propia

**Figura C.3. Determinación de flujograma III**



Fuente: Elaboración propia

**Figura C.4. Determinación de flujograma IV**



Fuente: Elaboración propia

**ANEXO D: Determinación de la densidad por balanza de lodos.**

**Figura D.1. Armado de la balanza calibrada en agua previamente**



Fuente: Elaboración propia

**Figura D.2. Lodo en el vaso de la balanza**



Fuente: Elaboración propia

**Figura D.3. Lectura de densidad en equilibrio**



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO E: Determinación de reología con viscosímetro FANN.

Figura E.1. Armado del Viscosímetro FANN



Fuente: Elaboración propia

Figura E.2. Medición de viscosidad del lodo en RPM



Fuente: Elaboración propia

Figura E.3. Lecturas de RPM del viscosímetro



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO F: Determinación del filtrado por Filtro prensa API

Figura F.1. Montaje del equipo Filtro API con el lodo



Fuente: Elaboración propia

Figura F.2. Obtención del filtrado en probeta de 10ml



Fuente: Elaboración propia

Figura F.3. Extracción del revoque al desmontar



Fuente: Elaboración propia

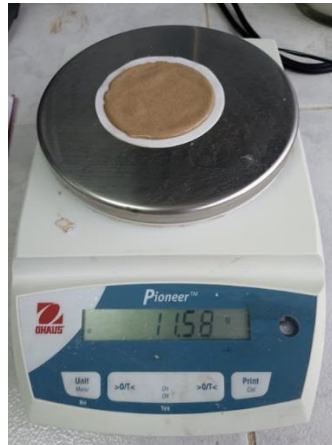
## Anexo G: Determinación del revoque

Figura G.1. Medición del espesor del revoque con vernier



Fuente: Elaboración propia

Figura G.2. Pesaje del revoque húmedo



Fuente: Elaboración propia

Figura G.3. Pesaje del revoque seco

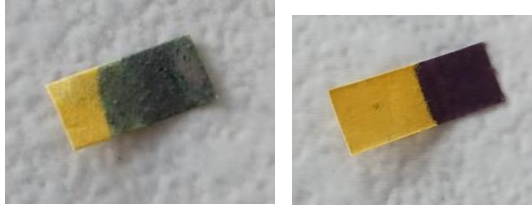


Fuente: Elaboración propia



## ANEXO H: Determinación de acidez por pH-metro

Figura H.1. Medición de acidez de lodo con chía y sin chía



Fuente: Elaboración propia

Figura H.2. Escala del pH-metro



Fuente: Elaboración propia

Figura H.3. Lodos con su respectivo pH-metro medido



Fuente: Elaboración propia

# ANEXO I: Ficha técnica del inhibidor de arcillas comercial



**PRODUCT NAME: CCDC-XCS III**

**DATA SHEET**

<p><b>Description</b>                  CCDC-XCS III shale stabilizer is a cloud point producing polyacrylamide that can be used in water-based drilling fluids to help improve lubricity and shale stability. It is recommended for use in potassium and sodium salt based fluids when highly reactive clays are anticipated. CCDC-XCS III shale stabilizer also helps to reduce bit-balling. is compatible with most water-based drilling fluids, is unaffected by contaminants, can decrease the HTHP filtration. CCDC-XCS III shale stabilizer is environmentally friendly and suitable for use world wide.</p>	<p><b>Applications and Functions</b>                  -Helps stabilize reactive formations                  -Helps increase lubricity of the drilling fluid                  -Helps reduce bit-balling tendencies                  -Helps decrease HTHP filtration                  -Used like a surfactant</p>	<p><b>Advantages</b>                  -Compatible with most water-based drilling fluids                  -Unaffected by contaminants                  -Environmentally responsible</p>												
<p><b>Typical Properties</b></p> <table border="0"> <tr> <td>-Appearance</td> <td>Clear colorless liquid</td> </tr> <tr> <td>-Specific gravity</td> <td>1.02</td> </tr> <tr> <td>-pH</td> <td>6.25</td> </tr> <tr> <td>-Solubility</td> <td>Water soluble</td> </tr> <tr> <td>-Viscosity</td> <td>3 cp</td> </tr> <tr> <td>-Yield Point</td> <td>3 lb/psi2</td> </tr> </table>	-Appearance	Clear colorless liquid	-Specific gravity	1.02	-pH	6.25	-Solubility	Water soluble	-Viscosity	3 cp	-Yield Point	3 lb/psi2	<p><b>Treatments</b>                  -Dose 2 – 5% by volume</p>	<p><b>Packaging</b>                  -CCDC-MSJ, 55-gal/drum</p>
-Appearance	Clear colorless liquid													
-Specific gravity	1.02													
-pH	6.25													
-Solubility	Water soluble													
-Viscosity	3 cp													
-Yield Point	3 lb/psi2													

Fuente: CCDC Corporatio

SILVANA WENDY RIOS FLORES

Email: [silvana17j15rf@gmail.com](mailto:silvana17j15rf@gmail.com)

Cel: 74076885



2024-TTES-241-D-1

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-955/2024  
La Paz, 02 de abril de 2024**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **26 de marzo de 2024**, por **SILVANA WENDY RIOS FLORES** con **C.I. N° 8320553 LP**, con número de trámite **DA 535/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A PARTIR DE LA SEMILLA DE CHÍA (Salvia Hispánica) COMO INHIBIDOR DE ARCILLAS PARA POZOS EN EL ÁREA DEL BOOMERANG HILLS"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena"*



fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

**POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

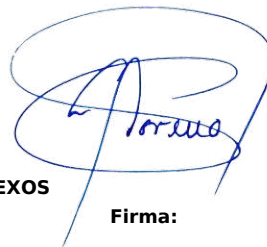
**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A PARTIR DE LA SEMILLA DE CHÍA (Salvia Hispánica) COMO INHIBIDOR DE ARCILLAS PARA POZOS EN EL ÁREA DEL BOOMERANG HILLS"** a favor de la autora y titular: **SILVANA WENDY RIOS FLORES** con **C.I. N° 8320553 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

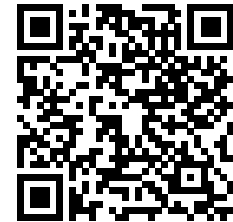
CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI  
**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**  
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



7gknt5Pm0Mo1E

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, N° 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
N° 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, N° 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, N° 366  
casi esq. Urriagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Callees Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, N° 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, N° 5837,  
entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas N° 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160

