

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA



PROYECTO DE GRADO

**FORTALECIMIENTO DE POZO DURANTE LA PERFORACION UTILIZANDO
MATERIALES A BASE DE FIBRAS NATURALES Y ADITIVOS BIODEGRADABLES
PARA LA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN LA FORMACIÓN
IQUIRI DEL POZO HCY 2.**

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN PETROLEO, GAS Y PROCESOS

POSTULANTE: UNIV. LOAYZA VARGAS EMERSON EDUARDO

TUTOR: M. Sc. ING. RODOLFO MAURICIO ÁLVAREZ VELASCO

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 mi padre Benito Loayza Tufiño, por guiarme, apoyarme, inculcarme buenos valores, códigos, ética y confiar en mí.

A mi madre Juana Vargas Flores (Q.E.P.D.), por ser la luz en mis momentos más oscuros, por ser mi fortaleza en mis debilidades y acompañarme siempre.

A mi segunda madre Graciela Martínez de Loayza, por aceptarme en su hogar y criarme como a un hijo.

A todos mis docentes de la poderosa carrera de ingeniería petrolera que formaron parte de mi formación académica y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todas las personas que formaron parte de mi vida a lo largo de mi travesía como estudiante universitario, gracias a mis docentes, a los administrativos, a todos mis compañeros y a amigos que la carrera de ingeniería petrolera me permitió conocer.

A la poderosa carrera de ingeniería petrolera de la UMSA, por regalarme el orgullo de a ver formado parte y ser uno más de sus profesionales.

Un agradecimiento especial a mi tutor Ing. Rodolfo Mauricio Álvarez Velasco, por la paciencia, honestidad, comprensión y ser un ejemplo de profesional a seguir.

Muchas gracias.

RESUMEN EJECUTIVO

A través de los años se buscado y se han desarrollado diversas formas para minimizar problemas operacionales durante la perforación de pozos como la pérdida de circulación. El fluido de perforación es parte fundamental del proceso de perforación y una pieza clave para que las operaciones de perforación se realicen según lo programado.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo formular fluidos de perforación con materiales orgánicos naturales como ser fibras y aditivos biodegradables (caña de azúcar, cedro y hierba), demostrar la capacidad y compatibilidad con el fluido de perforación siendo capaz de minimizar la pérdida de circulación y cumplir con los parámetros reológicos de la formación Iquiri.

Se realizó un diagnóstico de las características litológicas, estratigráficas y petrofísicas de la formación Iquiri, asimismo se realizó un estudio del tipo de fluido que se utilizó durante la perforación de la formación Iquiri del pozo Huacaya 2.

Mediante pruebas de laboratorio se determinó las propiedades reológicas y de filtrado de varios fluidos de perforación con aditivos de fibra de caña de azúcar, fibra de corteza de cedro y polvo de hierba, el fluido de perforación con aditivo de caña de azúcar fue el que presento el mejor resultado para minimizar la pérdida de circulación, cumpliendo con los parámetros reológicos y formando un revoque delgado y fino.

Finalmente se realizó un análisis técnico y económico de los fluidos propuestos, los cuales demostraron las ventajas y desventajas de su aplicación, los cuales técnicamente en su aspecto natural presentan mayores desventajas por parte del cedro y la hierba, pero que económicamente los 3 materiales son potencialmente viables al ser considerados como desechos. Mostrando un ahorro significativo en operaciones de perforación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	iv
CAPITULO 1.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.3.1. Identificación del problema	3
1.3.2. Diagrama de causa – efecto	4
1.3.3. Formulación del problema	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específico y acciones de la investigación	4
1.5. Justificación	5
1.5.1. Justificación técnica	5
1.5.2. Justificación económica	5
1.5.3. Justificación ambiental.....	6
1.6. Alcance	6
1.6.1. Alcance temático.....	6
1.6.2. Alcance geográfico	6
1.6.3. Alcance temporal	6
CAPITULO 2.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Geología estructural	7
2.1.1. Geología estructural de la formación iquiri	7
2.2. Principales funciones del fluido de perforación.....	8
2.2.1. Estabilidad del pozo	8
2.2.2. Refrigerar y lubricar la broca y la sarta de perforación	8
2.2.3. Limpieza del fondo del pozo.....	9
2.2.4. Control de las presiones de fondo.....	9
2.2.5. Suspensión y traslado de los recortes.....	10
2.2.6. Ayudar a soportar el peso de la sarta de perforación	11
2.2.7. Controlar la corrosión	11
2.2.8. Evaluación e información del pozo.....	12
2.2.9. Mantener la estabilidad de las paredes de formación	12
2.2.10. Minimizar el impacto sobre el medio ambiente.....	13

2.3.	Clasificación de los fluidos.....	13
2.3.1.	Fluidos base agua.....	14
2.3.2.	Fluidos base aceite.....	15
2.3.3.	Fluidos neumáticos.....	15
2.4.	Propiedades.....	17
2.4.1.	Propiedades químicas.....	17
2.4.2.	Propiedades físicas.....	17
2.4.3.	Propiedades reológicas.....	18
2.5.	Estabilidad de pozos.....	26
2.5.1.	Estabilidad mecánica.....	27
2.5.2.	Estabilidad química.....	28
2.5.3.	Causas de la inestabilidad de pozos.....	28
2.5.4.	Principales problemas de la estabilidad de pozos.....	34
2.6.	Descripción de los problemas de pérdidas de circulación.....	35
2.6.1.	Tipos de perdidas de circulación.....	35
2.6.2.	Clasificación de las pérdidas de circulación.....	37
2.6.3.	Consecuencias de las perdidas de circulación.....	38
2.6.4.	Aditivos de control de pérdida por filtrado.....	38
2.7.	Materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables.....	39
2.7.1.	Cedro.....	40
2.7.2.	Caña de azúcar.....	42
2.7.3.	Hierba.....	44
2.8.	Hidráulica de perforación.....	45
2.8.1.	Índice de consistencia y de flujo.....	45
2.8.2.	Velocidad media.....	46
2.8.3.	Viscosidad efectiva.....	47
2.8.4.	Numero de reynolds.....	48
2.8.5.	Factor de fricción.....	49
2.8.6.	Pérdida de presión.....	50
2.8.7.	Densidad equivalente de circulación.....	51
2.8.8.	Limpieza del pozo.....	51
2.9.	Pozo huacaya 2.....	53
2.9.1.	Ubicación del pozo hcy-2.....	53
2.9.2.	Prognosis geológica.....	54

2.9.3.	Diseño del pozo hcy-2	55
CAPITULO 3.....	.....	56
3.	APLICACIÓN PRACTICA.....	56
3.1.	Metodología de la investigación.....	56
3.2.	Ensayos de laboratorio para la determinación de propiedades del fluido de perforación	57
3.2.1.	Densidad del fluido (peso del lodo).....	57
3.2.2.	Viscosidad.....	58
3.2.3.	Filtración.....	61
3.2.4.	Mudware engineering software.....	62
3.3.	Realizar un diagnóstico geológico estratigráfico de la formación iquiri del pozo huacaya 2	63
3.3.1.	Información general de la formación iquiri	63
3.3.2.	Características de la formación iquiri	65
3.3.3.	Características de las rocas de la formación iquiri.....	66
3.3.4.	Análisis de presión en la formación iquiri del pozo huacaya 2 (hcy 2).....	67
3.3.5.	Análisis de las propiedades reológicas y de filtrado de fluidos de perforación utilizados en la formación iquiri	70
3.4.	Analizar los materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables.....	74
3.4.1.	Selección de los materiales fibrosos y el tipo de aditivo biodegradable.....	74
3.4.2.	Recolectar y analizar los materiales a base de fibras y el aditivo biodegradable	76
3.4.3.	Características generales de las fibras naturales y del aditivo biodegradable	82
3.5.	Formular el fluido de perforación con materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables.....	86
3.5.1.	Malla experimental	86
3.5.2.	Fibra de caña de azúcar.....	109
3.5.3.	Fibra de corteza de cedro	124
3.5.4.	Polvo de hierba	138
CAPITULO 4.....	.....	154
4.	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	154
4.1.	Evaluación técnica	154
4.1.1.	Comparación de los fluidos	155
4.2.	Evaluación económica	161
4.2.1.	Costo de los materiales fibrosos y el aditivo biodegradable.....	162
4.2.2.	Costo de volumen de fluido de perforación.....	163
4.2.3.	Costos generados por pérdida de circulación del fluido de perforación.....	165

4.2.4.	Comparación de costos del fluido utilizado en la formación iquiri y los fluidos propuestos	166
4.2.5.	Análisis de costo-beneficio	166
CAPITULO 5.....	.....	168
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	168
5.1.	Conclusiones	168
5.2.	Recomendaciones	171
BIBLIOGRAFÍA.....	.....	173
GLOSARIO TÉCNICO .....	.....	180
ANEXOS.....	.....	182
ANEXOS A: Aditivos usados en laboratorio .....	.....	182
ANEXOS B: Equipos que se usaron en los experimentos.....	.....	183
ANEXOS C: Resultados de las pruebas de filtrado.....	.....	184

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1:	Ventajas y desventajas de los fluidos base agua.....	15
Tabla 2:	Ventajas y desventajas de los fluidos base aceite.....	15
Tabla 3:	Ventajas y desventajas de los fluidos base neumático.....	16
Tabla 4:	Aditivos para el control de filtrado.....	39
Tabla 5:	Prognosis geológica pozo HCY-2.....	64
Tabla 6:	Información general de la formación iquiri.....	64
Tabla 7:	Lodos de perforación del pozo Huacaya 2.....	71
Tabla 8:	Propiedades del lodo en la formación Iquiri Pozo HCY 2.....	73
Tabla 9:	Aditivos utilizados en el fluido base.....	86
Tabla 10:	Resultado del lodo base.....	92
Tabla 11:	Densidad del fluido base.....	92
Tabla 12:	Propiedades reológicas del fluido base.....	93
Tabla 13:	Parámetros de viscosidad del fluido base.....	93
Tabla 14:	Descripción de la herramienta bha del pozo hcy 2.....	98
Tabla 15:	Datos del espacio interior del drill pipe.....	100
Tabla 16:	Capacidad y volumen del BHA en el espacio interior.....	100
Tabla 17:	Datos del espacio anular del drill pipe.....	101
Tabla 18:	Capacidad y volumen del bha en el espacio anular.....	102
Tabla 19:	Propiedades reológicas del fluido base.....	103
Tabla 20:	Hidráulica del fluido base en el espacio interior.....	105
Tabla 21:	Hidráulica del fluido base en el espacio anular.....	107
Tabla 22:	Resultado del lodo base con fibra de caña de azúcar.....	116
Tabla 23:	Densidad del fluido con fibra de caña de azúcar.....	116
Tabla 24:	Propiedades reológicas del fluido con fibra de caña de azúcar.....	117
Tabla 25:	Parámetros de viscosidad del fluido con fibra de caña de azúcar.....	117
Tabla 26:	Propiedades reológicas del fluido con fibra de caña de azúcar.....	121
Tabla 27:	Hidráulica del fluido con fibra de caña de azúcar en el espacio interior.....	122
Tabla 28:	Hidráulica del fluido con fibra de caña de azúcar en el espacio anular.....	122
Tabla 29:	Resultado del lodo base con Fibra de corteza de cedro.....	130
Tabla 30:	Densidad del fluido con fibra de corteza de cedro.....	131
Tabla 31:	Propiedades reológicas del fluido con fibras de corteza de cedro.....	132
Tabla 32:	Parámetros de viscosidad del fluido con fibra de corteza de cedro.....	132
Tabla 33:	Propiedades reológicas del fluido con fibra de corteza de cedro.....	136
Tabla 34:	Hidráulica del fluido con fibra de corteza de cedro en el espacio interior.....	137
Tabla 35:	Hidráulica del fluido con fibra de corteza de cedro en el espacio anular.....	137
Tabla 36:	Resultado del lodo base.....	145
Tabla 37:	Densidad del fluido con polvo de hierba.....	145
Tabla 38:	Propiedades reológicas del fluido con polvo de hierba.....	146
Tabla 39:	Parámetros de viscosidad del fluido con el polvo de hierba.....	146
Tabla 40:	Propiedades reológicas del fluido con polvo de hierba.....	151
Tabla 41:	Hidráulica del fluido con polvo de hierba en el espacio interior.....	152
Tabla 42:	Hidráulica del fluido con polvo de hierba en el espacio anular.....	152
Tabla 43:	Propiedades generales del fluido de perforación.....	155
Tabla 44:	Resultados de pruebas de densidades.....	156

Tabla 45:	resultados promedio de las pruebas de reología de los fluidos.....	157
Tabla 46:	Pruebas de filtrado y revoque del fluido base con fibra de caña, cedro y hierba.....	158
Tabla 47:	pruebas de revoque de los fluidos.....	159
Tabla 48:	resultados de los calculos de velocidad de asentamiento de los recortes y limpieza de pozo	160
Tabla 49:	Porcentaje de cada aditivo presente en el fluido.....	162
Tabla 50:	Costo de aditivos para formulación de cada fluido.....	162
Tabla 51:	Costo de la caña de azúcar, cedro y hierba	163
Tabla 52:	Costo total de un barril del fluido propuesto	163
Tabla 53:	Costo de un barril de fluido de perforación	164
Tabla 54:	Análisis de pérdida de circulación	164
Tabla 55:	Costo por pérdida de circulación en un tiempo de 1 hrs.....	165
Tabla 56:	Costo por pérdida de circulación en un tiempo de 0,8 hrs.....	165
Tabla 57:	Comparación de costos entre el fluido de perforación y los fluidos propuestos.....	166
Tabla 58:	Análisis de Costo-beneficio	167

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1:	Diagrama causa – efecto	4
FIGURA 2:	Corte estructural de la formación iquiri	8
FIGURA 3:	Presiones de formación	10
FIGURA 4:	Transporte de solidos	11
FIGURA 5:	Tipos de fluidos de perforación	13
FIGURA 6:	A) Representación gráfica de un Fluido Newtoniano, B) Curva de viscosidad: viscosidad versus velocidad de corte	21
FIGURA 7:	Modelo de Bingham.....	22
FIGURA 8:	Modelo de Ley Exponencial	23
FIGURA 9:	Modelo de Herschell - Buckley	25
FIGURA 10:	Perforación a través de formaciones naturalmente fracturadas o falladas	29
FIGURA 11:	Perforación a través de formaciones estresadas tectónicamente	30
FIGURA 12:	Perforación a través de formaciones móviles	31
FIGURA 13:	Perforación a través de formaciones no consolidadas	32
FIGURA 14:	Efecto de la densidad del fluido de perforación en los esfuerzos en la pared de la cara del pozo	33
FIGURA 15:	Efecto de la inclinación y del peso del lodo en la estabilidad de pozos	34
FIGURA 16:	Árbol de cedro	41
FIGURA 17:	La distribución del cedro en bolivia	41
FIGURA 18:	Caña de azúcar	42
FIGURA 19:	Área de producción en el departamento de santa cruz.....	43
FIGURA 20:	Área de producción en el departamento de tarija	43
FIGURA 21:	Hierbas gramíneas Raygras inglés perenne (<i>Lolium perenne</i>)	44
FIGURA 22:	Hierbas leguminosas	45
FIGURA 26:	Partes de viscosímetro rotatorio fann 35A.....	60
FIGURA 28:	Mudware engineering software	62
FIGURA 29:	Ventana de perforación del pozo huacaya-2.....	68
FIGURA 30:	Vendedor ambulante de jugo de caña de azúcar.....	76
FIGURA 31:	Corteza de cedro	77
FIGURA 32:	Zona de recolección de la hierba	78
FIGURA 33:	Caña de azúcar recién procesada	78
FIGURA 34:	Secado de la caña de azúcar.....	79
FIGURA 35:	Fibra caña de azúcar	79
FIGURA 36:	Fibra corteza de cedro.....	80
FIGURA 37:	Polvo de hierba	81
FIGURA 38:	Composición química de la caña de azúcar	83
FIGURA 39:	Composición química del cedro (<i>cedrela odorata</i>)	84
FIGURA 40:	Composición química de los pastos.....	85
FIGURA 41:	Comportamiento reológico del fluido base.....	94
FIGURA 42:	Comportamiento reológico del fluido base.....	95
FIGURA 43:	Revoque del fluido base.....	97
FIGURA 44:	Arreglo de perforación del pozo hcy 2	99
FIGURA 45:	Comportamiento reológico del fluido con fibra de caña de azúcar	118
FIGURA 46:	Comportamiento reológico del fluido con fibra de caña de azúcar	119

FIGURA 47:	Revoque del fluido con fibra de caña de azúcar	121
FIGURA 48:	Comportamiento reológico del fluido con fibra de corteza de cedro.....	133
FIGURA 49:	Comportamiento reológico del fluido con fibra de corteza de cedro.....	134
FIGURA 50:	Revoque del fluido con fibra de corteza de cedro	136
FIGURA 51:	Comportamiento reológico del fluido con el polvo de hierba	148
FIGURA 52:	Comportamiento reológico del fluido con el polvo de hierba	149
FIGURA 53:	Revoque del fluido con el polvo de hierba	151
FIGURA 54:	Comparativa de densidades promedios de los fluidos	156
FIGURA 55:	Comparación gráfica del parámetro del yield point y viscosidad del fluido base, caña de azúcar, fibra de cedro y polvo de hierba	157
FIGURA 56:	Comparativa del filtrado de los fluidos.....	159
FIGURA 57:	Comparativa de los resultados de la limpieza de pozo	161
FIGURA 58:	Baritina e hidróxido de potasio	182
FIGURA 59:	Bentonita y Mil pac-R.....	182
FIGURA 60:	Tamizado de los materiales.....	183
FIGURA 61:	Agitador o mixer de acero inoxidable – mezcla de aditivos.....	183
FIGURA 62:	Determinación de la densidad con balanza de lodo	183
FIGURA 63:	Viscosímetro FANN y Filtrado de prensa API.....	184
FIGURA 64:	Pruebas de filtrado y revoque	184

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los retos que se presentan en la industria petrolera, en las perforaciones de nuevos pozos y en el historial de todos los pozos que presentan o presentaron algún grado de pérdida de circulación durante la perforación, buscan la necesidad de la implementación de un método o tecnología que nos permita resolver esta problemática. Uno de los eventos más comunes en la perforación son las pérdidas de circulación, este evento puede dar lugar a graves consecuencias. El fortalecimiento de pozo como un nuevo concepto dio lugar a productos mejorados y de rendimiento para combatir las pérdidas de circulación en pozo. Aunque se pueden aplicar muchas tecnologías diferentes para controlar eficazmente el pozo y reducir las pérdidas de circulación, siempre se prefieren tecnologías preventivas de fortalecimiento del pozo por varias razones.

La elección de los diferentes tratamientos depende del tipo de formación geológica a la que se apunta como objetivo de la causa de las pérdidas de circulación y de si se requiere una solución permanente o temporaria. Estas prácticas para la prevención y mitigación son dictaminadas en su mayoría por la situación y se toman en cuenta parámetros tales como presión de formación, tipo de formación, propiedades del fluido de perforación, regulaciones ambientales locales y disponibilidad de materiales LCM.

En busca de encontrar una disminución del impacto ecológico y económico de los materiales LCM para pérdidas de circulación se han desarrollado varios materiales LCM ecológicos. Es vista de esta necesidad este proyecto realizará la investigación de los materiales a base fibras naturales

(fibra de corteza de cedro y fibra de caña de azúcar) y aditivos biodegradables (polvo fino de hierba), con el fin de prevenir las pérdidas de circulación durante la perforación.

Este estudio intenta demostrar los beneficios del uso de los materiales a base de fibra naturales y aditivos biodegradables como material preventivo de pérdidas de circulación en busca de beneficios técnicos y económicos de las operaciones de perforación.

1.2. ANTECEDENTES

En el último siglo, la industria del petróleo y el gas ha logrado avances importantes en el desarrollo de tecnologías y técnicas de perforación que convierten la construcción de pozos en una industria rentable y segura. Las diferentes investigaciones que se han realizado para pérdidas de circulación han dado como resultado a diferentes aditivos, entre ellas píldoras avanzadas.

Sin embargo, los últimos años también se han realizado investigaciones de materiales LCM ecológicos, es así que en la industria poco a poco realiza prácticas más involucradas con el medio ambiente. Las diferentes fibras y aditivos biodegradables que se han utilizado en operaciones de perforación no solo reducen las implicaciones negativas para el medio ambiente, sino que también reducen los costos operativos.

Algunos de los materiales a base de fibras naturales que se han investigado es la fibra de coco en la universidad de Port Harcourt en Nigeria – África, demostrando una reducción de costo de operaciones. Así también se han realizado investigaciones exitosas en los laboratorios sobre la efectividad de los aditivos biodegradables, algunas de las investigaciones que se han realizado son el polvo de la cascara de papa, el polvo de cascara de mandarina, celulosa de mazorca de maíz, material de desechos alimenticios fibrosos, etc.

Es aquí donde nace la intención de buscar los mejores materiales y aditivos biodegradables hacer investigados en este proyecto, la elección de estos materiales es: la fibra de corteza de cedro y la fibra de caña de azúcar, así también como aditivo biodegradable, al polvo fino de hierba.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

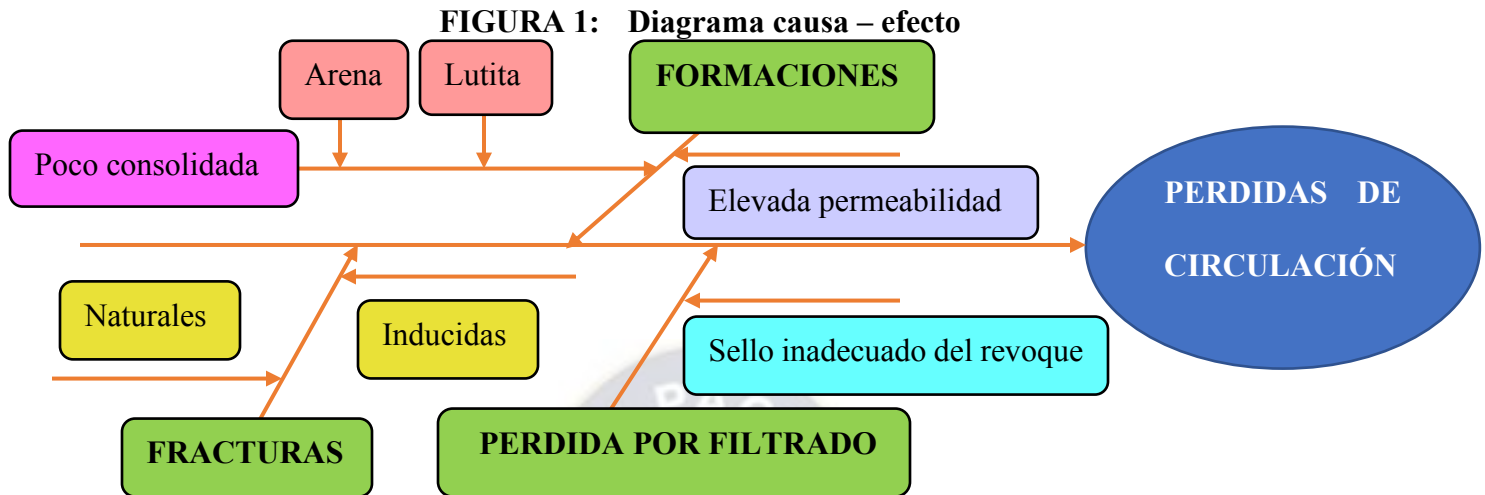
1.3.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En vista de la necesidad que se tiene de optimizar el trabajo dentro de la industria para obtener mayores beneficios, nace la necesidad de investigar y/o desarrollar tecnologías que brinden ese plus dentro de las explotaciones de hidrocarburos dentro de nuestro país. Es así que se nota un defecto aceptado y medido dentro de los trabajos de operación el cual es la pérdida del fluido de perforación.

Esta se da en formaciones naturalmente fracturadas o fracturas inducidas durante la operación de perforación, la pérdida de todo el lodo de perforación en la formación, generan costos y riesgos significativos en el pozo, esta es una amenaza que plantea desafíos mayores en el futuro conforme las exploraciones van ofreciendo retos mayores.

En los pozos en general se encaran estas amenazas con diversos materiales de fortalecimiento, que operan a través de mecanismos diferentes, pero comparten un objetivo en común detener el crecimiento de las fracturas y mantener el lodo de perforación dentro del pozo.

1.3.2. DIAGRAMA DE CAUSA – EFECTO



Fuente: Elaboración propia

1.3.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿La formulación del lodo perforación hecho de materiales a base de fibras naturales y/o aditivos biodegradables disminuirá las pérdidas de circulación en la formación Iquiri del pozo Huacaya 2?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la propuesta que coadyuve en la reducción de costos, aplicando materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables para la disminución de las pérdidas de circulación en la formación Iquiri del pozo huacaya 2.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO Y ACCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- Realizar un diagnóstico geológico estratigráfico de la formación Iquiri del pozo Huacaya 2
- Analizar los materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables
- Formular el fluido de perforación con materiales a base de fibras naturales y/o aditivos biodegradables

- Analizar la viabilidad de la propuesta

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

De manera técnica, el presente proyecto se enfoca en la investigación del efecto y comportamiento de lodos de perforación formulados con materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables. La optimización de las operaciones de perforación, sin comprometer la integridad del medio ambiente, ha sido un objetivo constante en la industria. Durante varios años, se han buscado y desarrollado principios ecológicos que permiten la ejecución de perforaciones sostenibles, promoviendo el uso de materiales menos perjudiciales, un enfoque innovador que no solo busca mejorar la eficiencia de las operaciones de perforación, sino que resulten como prácticas más sostenibles en la industria. La investigación propuesta contribuirá al desarrollo de soluciones que respeten el medio ambiente y, al mismo tiempo, optimicen los procesos de perforación en el campo. Todo esto será simulado con los parámetros realizados en la perforación del pozo Huacaya 2 en la formación Iquiri.

1.5.2. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

La búsqueda de la industria por optimizar los trabajos de exploración, permite la investigación de nuevos materiales que resulten económicos para su aplicación, es por tanto que las investigaciones se inclinaron por materiales naturales y aditivos biodegradables, que aparte de tener un impacto favorable al medio ambiente resulta tener un impacto económico muy importante, según los estudios el poder implementar estos materiales resultan en optimizar los tiempos de operación, esto se resume en que el formular un lodo de perforación con materiales naturales y/o aditivos biodegradables coadyuva en la reducción de los costos de operación y de lodo.

1.5.3. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

Poco a poco la industria petrolera toma mayor interés y se enfoca en tecnología que favorecen ampliamente al medio ambiente siendo ellos de origen natural orgánico o aditivos biodegradables, los cuales no representan ningún daño a las formaciones, respetando las leyes y normativas medio ambientales.

1.6. ALCANCE

1.6.1. ALCANCE TEMÁTICO

La investigación de este proyecto se basa en prevenir las pérdidas de circulación del lodo de perforación durante las operaciones de pozo implementando materiales a base de fibras naturales y aditivos biodegradables, encontrar la factibilidad de la aplicación en la formación Iquiri en el pozo Huacaya 2. Realizando un análisis beneficio – costo del proyecto.

1.6.2. ALCANCE GEOGRÁFICO

El presente proyecto enfocara su estudio en la formación Iquiri en el pozo Huacaya 2, del bloque caipipendi, operado por la empresa REPSOL E&P BOLIVIA S.A. Ubicado en las coordenadas de superficie: X: 425.316,22; Y: 7'686.901,27 m; UTM / PSAD 56

1.6.3. ALCANCE TEMPORAL

El presente proyecto estimo un tiempo de culminación de 3 meses o más. Para el desarrollo del proyecto se eligió un diseño de investigación experimental donde se realizarán pruebas preliminares en laboratorio analizando el comportamiento de cada material.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

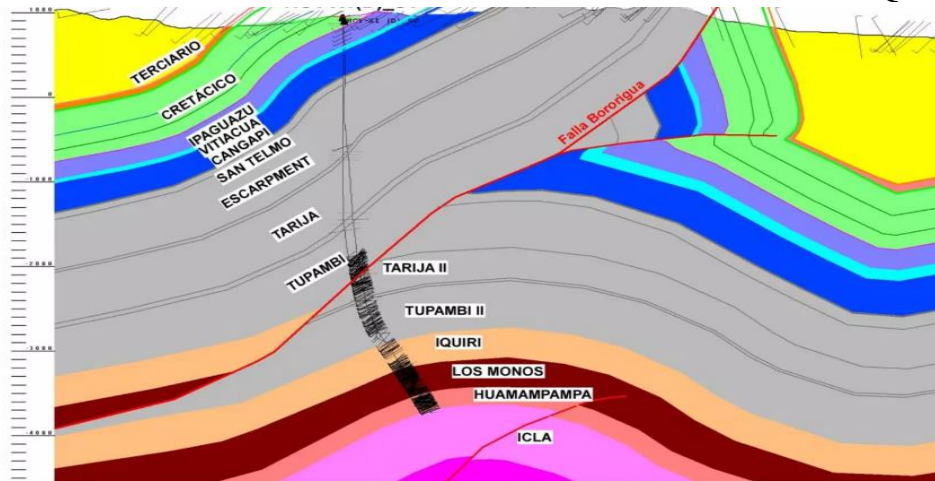
La Geología Estructural es una rama de la geología, esta estudia la deformación de las rocas en respuesta a las tensiones que actúan dentro de la tierra, es decir, las rocas y minerales por las que está constituida la corteza terrestre, se adaptan a las tensiones que actúan sobre ellas, llevando un registro de las estructuras geológicas como fracturas fallas o pliegues. (Geological Survey Of Norway, 2015)

La geología estructural, es esencial para exploración de hidrocarburos y minerales, debido a que su estudio proporciona información sobre las estructuras de trampas rocas pliegues, anticlinales y sinclinales por las cuales están estructurados los sistemas de reservorios. (Rey, 2016)

2.1.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DE LA FORMACIÓN IQIRI

Según los reportes se tuvieron más de 200 filtraciones de petróleo en la Zona Subandina de Bolivia, las cuales se clasificaron en relación a su posición estructural, con un 60% debido a grandes fallas de empuje, 30% fallas anticlinales y el 10% monoclinales, sin embargo, en la parte superior del Devónico la mayoría de las filtraciones se generan dentro o debajo de la zona de falla. (Moretti, I., Labaume, Compartmentalisation of fluid migration pathways in the sub-Andean Zone , Bolivia. 348, 5–24., 2002)

FIGURA 2: CORTE ESTRUCTURAL DE LA FORMACIÓN IQIRI



Fuente: (Repsol, 2010)

2.2. PRINCIPALES FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

2.2.1. ESTABILIDAD DEL POZO

“Los fluidos de perforación sirven para prevenir la erosión y el colapso de la pared del pozo. Cuando se perforan formaciones porosas y permeables, la presión hidrostática evita que las formaciones inconsolidadas (como arenas) caigan dentro del pozo. Cuando se perforan sales con tendencia al hinchamiento se prefieren lodos en base aceite, pues el aceite a diferencia del agua no es absorbido por las arcillas. El lodo en base agua puede ser usado si se trata con compuestos de Ca/K/Asfalto. Para evitar la disolución de secciones saladas, se pueden utilizar lodos saturados de sal o en base aceite.” (Hawker, 2001)

2.2.2. REFRIGERAR Y LUBRICAR LA BROCA Y LA SARTA DE PERFORACIÓN

La acción de la perforación y la rotación de la sarta de perforación eleva considerablemente la temperatura en la broca y en toda la sarta provocada por la fricción. Esta temperatura es absorbida por el fluido de perforación, trasladado y liberado hasta la superficie. Por otra parte, el fluido de perforación lubrica la broca y la sarta, reduciendo la fricción. Los lodos en base agua proveen una

moderada lubricación, pero los sistemas en base aceite y emulsificados, incrementan la lubricación al tiempo que reducen el torque, aumentan la vida de la broca y de la sarta de perforación reduciendo la presión al haber reducido la fricción. (Hawker, 2001)

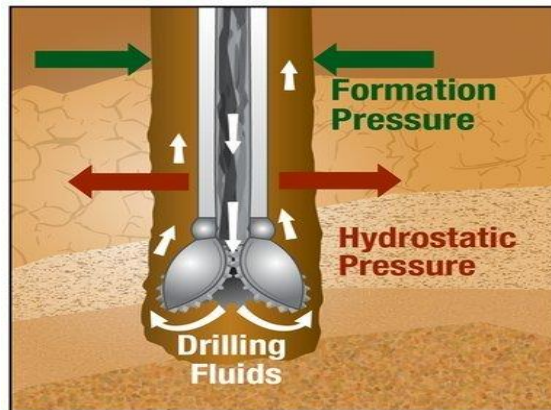
2.2.3. LIMPIEZA DEL FONDO DEL POZO

“El fluido de perforación pasa a través de las boquillas o jets para expulsar los cortes de la perforación de debajo de la broca y arrastrarlos a través del anular a la superficie. Esto sirve para mantener el fondo del pozo limpio de cortes y prevenir el empacamiento de la broca (Acumulación de los cortes y embalamiento de la broca), aumentando así la vida de la broca e incrementando la eficiencia de la perforación. La efectividad del fluido de perforación en el proceso depende de factores como la velocidad de impacto al pasar por las boquillas, y la densidad y la viscosidad del lodo.” (Hawker, 2001)

2.2.4. CONTROL DE LAS PRESIONES DE FONDO

El fluido de perforación es bombeado a través de la sarta de perforación, a través de la barrena y de regreso por el espacio anular, a medida que la presión de formación incrementa, la densidad de fluido incrementa de igual manera, por el cual se agrega aditivos al fluido de perforación para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad del agujero. La presión hidrostática de la columna de fluido debe ser igual o ligeramente mayor a la presión de formación como se muestra en la figura 8, de tal manera, que los fluidos de formación no fluyan dentro del pozo, asimismo la presión de fluido no debe exceder la presión de formación, tal situación originaria pérdida de circulación. (Williamson, 2013)

FIGURA 3: Presiones de formación



Fuente: (Vryzas, 2017)

Las siguientes formulas se pueden utilizar para calcular la presión hidrostática total a cualquier profundidad con una densidad del fluido:

$$\text{Presión hidrostática (psi)} = 0.052 \times \text{profundidad (pies)} \times \text{densidad del fluido (lbm/gal)}$$

$$\text{Presión hidrostática (psi)} = 0.00695 \times \text{profundidad (pies)} \times \text{densidad del fluido (lbm/ft}^3\text{)}$$

$$\text{Presión hidrostática (Kg/cm}^2\text{)} = 0.1 \times \text{profundidad (m)} \times \text{densidad del fluido (g/cm}^3\text{)}$$

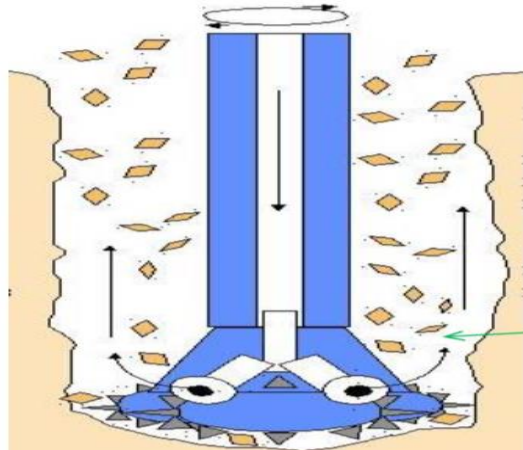
Si bien las presiones estáticas son importantes para controlar la entrada de fluidos de formación, también se deben considerar las condiciones dinámicas de los fluidos. La circulación del fluido de perforación y el movimiento de la sarta de perforación dentro y fuera del pozo crean diferenciales de presión positivos y negativos. Estos diferenciales están directamente relacionados con las propiedades de flujo, la tasa de circulación y la velocidad del movimiento de la tubería de perforación.

2.2.5. SUSPENSIÓN Y TRASLADO DE LOS RECORTES

El fluido de perforación que se vaya a formular debe contar con la capacidad de arrastrar y transportar los recortes hasta superficie, las propiedades de densidad y viscosidad juegan un papel

fundamental para suspender los recortes desde fondo de pozo hasta superficie como se puede ver en la figura 4. (Williamson, 2013)

FIGURA 4: Transporte de solidos



Fuente: Vryzas & Kelessidis, (2017)

2.2.6. AYUDAR A SOPORTAR EL PESO DE LA SARTA DE PERFORACIÓN

El efecto de flotación de los fluidos de perforación se vuelve cada vez más importante a medida que la perforación avanza a mayores profundidades. El equipo de perforación de superficie estaría sobrecargado si tuviera que soportar todo el peso de la sarta de perforación y la cañería de revestimiento en pozos más profundos, dado que el fluido de perforación soportara un peso igual al peso del volumen de fluido desplazado, produciendo un mayor efecto de flotabilidad a medida que aumenta la densidad del fluido de perforación.

2.2.7. CONTROLAR LA CORROSIÓN

A menudo los componentes de la tubería se encuentran en contacto con el fluido de perforación siendo propenso a varias formas de corrosión, los gases disueltos como; oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno pueden causar problemas graves de corrosión, al adicionar

inhibidores químicos al fluido de perforación este mantiene la corrosión a un nivel aceptable.
(Energy API, 2001)

2.2.8. EVALUACIÓN E INFORMACIÓN DEL POZO

El fluido de perforación debe conservar un estándar de alta calidad durante todas las fases de perforación, registro y terminación para facilitar la toma de núcleo y la evaluación de las formaciones perforadas, más aún cuando se trata de la zona productora. Las nuevas tecnologías han dado paso al uso de dispositivos electrónicos que son incorporados dentro de la sarta de perforación permitiendo que la adquisición de registros y la perforación sean actividades simultáneas. Por tal motivo resulta de tanta importancia obtener la máxima información sobre todas las formaciones que se estén perforando.

2.2.9. MANTENER LA ESTABILIDAD DE LAS PAREDES DE FORMACIÓN

El fluido debe contar con el peso adecuado, suficiente para equilibrar los esfuerzos, formando un revoque de calidad en las paredes de la formación, es por tanto que el obtener la mejor estabilidad del pozo se obtiene cuando se mantiene su tamaño y la forma cilíndrica. (Energy API, 2001)

Es así que la adición de cascarillas u otros aditivos para control de pérdidas puede ser necesaria para reducir la pérdida de la fracción líquida del fluido de perforación. Una pérdida de filtrado excesiva tendrá como resultado una capa de torta de lodo excesivamente gruesa, reduciendo el diámetro efectivo del pozo, incrementando la posibilidad de una pega de tubería o del suaveo (swabbing) del pozo al mover hacia arriba la tubería y arrancar la torta, exponiendo nuevamente la pared del pozo. (Hawker, 2001)

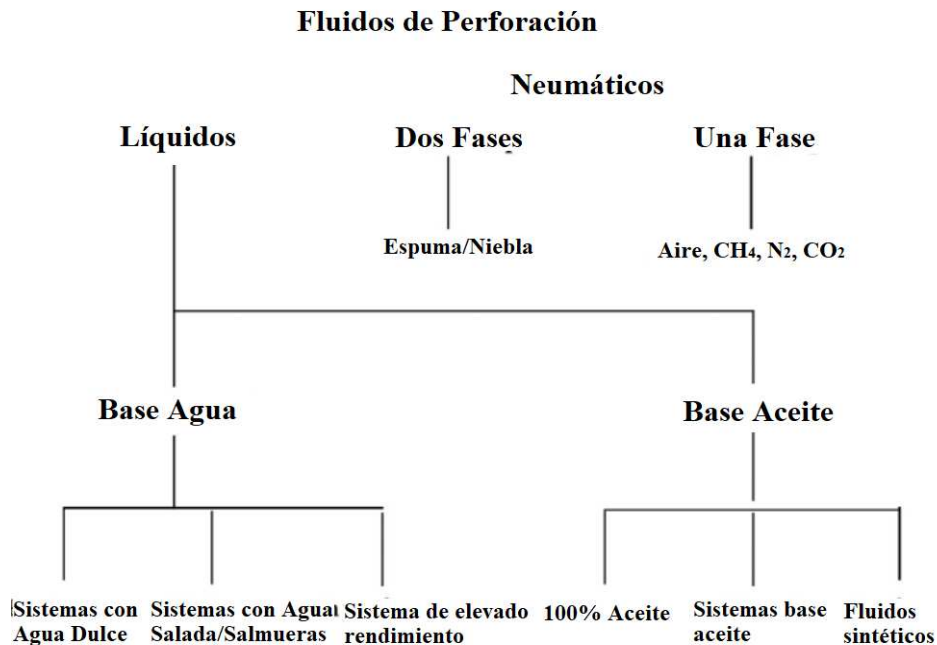
2.2.10. MINIMIZAR EL IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Al transcurrir el tiempo el fluido de perforación es desechado y eliminado según reglamentos ambientales, dependiendo del tipo de fluido utilizado, frecuentemente aquellos fluidos base aceite son tratados antes de ser desechados debido a diversas condiciones. (Cano Tocas, 2019)

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

La clasificación de los lodos de perforación se basa en su alcalinidad de fase fluida, dispersión y el tipo de productos químicos utilizados.

FIGURA 5: Tipos de fluidos de perforación



Fuente: Adaptado de (Caenn, 2017)

Las partículas sólidas en el lodo se dividen por su tamaño estos son:

- **Coloides orgánicos:** También denominados polímeros, pueden dispersarse en agua de alto peso molecular, son esenciales para controlar las propiedades reológicas del fluido y la pérdida en fluidos a base de salmuera.

- Coloidales inorgánicos: Se componen esencialmente de material arcilloso activo que se ha hidratado y dispersado completamente, el comportamiento de estas partículas se rige por las cargas electrostáticas que generan fuerzas atractivas o repulsivas en sus superficies, los minerales arcillosos son activos debido a que su estructura molecular genera cargas negativas en superficie y cargas positivas en sus bordes, dicha interacción entre cargas influye en la viscosidad de los fluidos, generando una estructura de gel reversible cuando el fluido de perforación se encuentra en reposo.
- Los sólidos perforados: generalmente se componen de arcillas activas y varios tipos de minerales inertes.
- Lodos a base de agua: pueden ser agua dulce o diferentes tipos de salmueras. Los sólidos consisten en arcillas y coloides orgánicos añadidos para proporcionar las propiedades viscosas y de filtración necesarias.

2.3.1. FLUIDOS BASE AGUA

Son los más usados a nivel mundial, porque son de bajo costo y generan menor impacto ambiental, generalmente este tipo de fluidos contiene agua en su fase continua, un aditivo típico utilizado como agente es la barita, que se agrega al fluido de perforación para incrementar la densidad y controlar la presión de formación. La principal dificultad en un fluido de perforación base agua es su tendencia a degradarse a altas temperaturas, siendo este más viscoso dificultando su circulación. (Alkhalaf, 2019 March, 26–28). Algunas ventajas y desventajas del fluido base agua se mencionan en la tabla 1.

TABLA 1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FLUIDOS BASE AGUA

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Menos agresivo con el medio ambiente.	Menor estabilidad a elevadas temperaturas.
Facilita la detección del gas.	No son adecuadas en operaciones exigentes de perforación.
Mayor tasa de penetración de la broca.	
Mayor facilidad en el combate contra la pérdida de circulación.	No pueden ser usados en formaciones sensibles al agua.
Menor costo inicial.	

Fuente: Rossy y Guimaraes (2009)

2.3.2. FLUIDOS BASE ACEITE

Son fluidos cuya fase continua es el aceite, son comúnmente usados en condiciones de altas temperaturas y presiones, asimismo se utiliza en formaciones altamente reactivas. En la tabla 2 se muestra las ventajas y desventajas del fluido base aceite. (Díaz, 2017)

TABLA 2: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FLUIDOS BASE ACEITE

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Propiedades reológicas estables y controlables a temperaturas por encima de 500°F	Elevado costo inicial
Efectivos contra todo tipo de corrosión	Requieren más operaciones de control de contaminación
Mayor lubricación	Dificultad para combatir la pérdida de circulación
Permiten operar con bajas densidades de fluido	
Excelentes para perforar formaciones salinas y lutitas reactivas	Dificultad en la detección de gas debido a la solubilidad del gas en la fase aceite

Fuente: (Bourgoyne Jr, 1991)

2.3.3. FLUIDOS NEUMÁTICOS

También denominado perforación de aire o gas, se puede decir que un fluido de perforación neumático es un gas seco (aire, gas natural, nitrógeno, dióxido de carbono, etc.). Este tipo de

fluidos son utilizados en perforaciones donde los fluidos líquidos no son adecuados, se utilizan en formaciones altamente porosas o formaciones subnormales presurizadas.

2.3.3.1. AIRE SECO

Es más adecuado para formaciones que tiene una cantidad mínima de agua, uno de los riesgos al utilizar este tipo de lodo es que puede ocasionar explosiones o derrumbes en presencia del gas metano.

2.3.3.2. ESPUMAS

Este tipo de fluidos son elaborados con una combinación de surfactantes, polímeros, arcillas y agua. La capacidad que tienen los fluidos elaborados con espuma es la de acarrear eficientemente los recortes debido a su alta viscosidad, en comparación con los fluidos de aire seco, los de tipo espuma ejercen mayor una presión sobre las formaciones. (Rubí Villegas, 2017)

En la tabla 3 se muestra algunas ventajas y desventajas que presentan los fluidos neumáticos.

TABLA 3: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FLUIDOS BASE NEUMÁTICO

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Menos agresivo con el medio ambiente	Pueden erosionar las formaciones
Facilita la detección de zonas productoras	No son adecuadas en operaciones exigentes de perforación
Mayor tasa de penetración de la broca	Menor evaluación de las formaciones
Mayor facilidad en el combate contra la pérdida de circulación	Riesgo de incendio en el fondo de pozo
Menor costo inicial	

Fuente: (Bourgoyne Jr, 1991)

2.4. PROPIEDADES

2.4.1. PROPIEDADES QUÍMICAS

2.4.1.1. 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. (Gonzales, 2016)

2.4.1.2. ALCALINIDAD

La temperatura tiene efectos sobre la alcalinidad del fluido que causa las propiedades más diluidas del fluido y tiene efectos sobre el proceso de floculación y defloculación. (Rahman K. M., Analysis of Drilling Fluid Rheology & Pressure Drop Modelling to Improve Drilling Efficiency [Unpublished master`s degree]. , 2018)

2.4.2. PROPIEDADES FÍSICAS

2.4.2.1. DENSIDAD

La densidad del lodo es la relación de peso por unidad de volumen de lodo. La densidad del lodo se utiliza para proporcionar presión hidrostática y así controlar el pozo en la operación de perforación. La densidad puede ser determinada a partir de la ecuación 1.

Ecuación de densidad

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Fuente: Brañez, (2019)

Donde:

$\rho =$ Densidad del fluido (g/ml)(ppg)

$m = \text{Masa (g)(lb)}$

$v = \text{Volumen (ml)(gal)}$

2.4.2.2. VISCOSIDAD

La viscosidad representa una medida de la resistencia de la materia a una fuerza deformante, es decir, indica la resistencia del fluido de perforación a fluir, definida como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte (Al-Khdheawi, 2019)

Ecuación de viscosidad

$$\mu = \frac{T}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

Fuente: (Brañez Ramos, 2019)

Donde:

$\mu = \text{Viscosidad (cP)}$

$\tau = \text{Esfuerzo de corte (dina/cm}^2\text{)}$

$\dot{\gamma} = \text{Velocidad de corte (1/seg)}$

La viscosidad se ve muy afectada por la velocidad de corte, al incrementar la velocidad de corte en los fluidos de perforación de alta viscosidad se tiende a mejorar la capacidad de retención de sólidos.

2.4.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas indican el carácter de deformación y flujo, se prueban a lo largo de las operaciones de perforación para caracterizar el comportamiento de los fluidos de perforación.

La velocidad y esfuerzo de corte son parámetros o variables que definen a las propiedades reológicas.

- Velocidad de corte: Denominada también Shear Rate, es la velocidad a la cual una capa pasa por delante de otra capa dividida por la distancia entre ellas.
- Esfuerzo de corte: Es la fuerza por unidad de superficie requerida para mantener constante la velocidad de movimiento de un fluido, por ejemplo; si un fluido es colocado entre dos capas paralela a una determinada distancia y se le aplica una fuerza a un determinado punto para mantenerlo en movimiento, el esfuerzo cortante en el fluido será la relación de la fuerza entre la distancia.

2.4.3.1. VISCOSIDAD PLÁSTICA (PV)

Indica la cantidad de sólidos existentes en el fluido de perforación, el aumento incontrolado del contenido de sólidos del lodo puede provocar muchos problemas críticos durante la perforación, como el atascamiento de la tubería y la reducción de la tasa de penetración (Gowida et al., 2020).

La ecuación de la viscosidad plástica viene dada por:

Ecuación de viscosidad plástica

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

Fuente: (Dankwa, 2018)

Donde:

μ_p = Viscosidad plástica (Poise o cP)

θ_{600} = Lectura del cuadrante a 600 rpm

θ_{300} = Lectura del cuadrante a 300 rpm

2.4.3.2. VISCOSIDAD APARENTE (AV)

Es el esfuerzo cortante aplicado a un fluido en relación con la velocidad de corte. Los fluidos newtonianos que incluyen agua pura tienen una viscosidad predecible y siempre fluirán de manera

predecible, independientemente de las fuerzas que actúen sobre ellos. También tienen cambios de viscosidad predecibles que son sensibles a la presión y la temperatura. (Brunet, 2020)

La viscosidad aparente se calcula mediante la siguiente ecuación

Ecuación de viscosidad aparente

$$VA = \frac{\theta_{300}}{2} \quad (4)$$

Fuente: (Dankwa, 2018)

Donde:

VA = Viscosidad plástica (cP)

θ_{300} = Lectura del cuadrante a 300 rpm

2.4.3.3. PUNTO CEDENTE (YP)

El punto cedente es un parámetro reológico que mide las fuerzas de atracción entre las partículas coloidales dentro del fluido de perforación. La optimización de YP afecta significativamente la eficiencia de la limpieza del pozo. (Gowida, 2020). El punto cedente se calcula con la ecuación 5.

Ecuación de punto cedente

$$YP = \theta_{300} - \mu_P \quad (5)$$

Fuente: (Dankwa, 2018)

Donde:

YP = Punto cedente (lb/100 pie²)

θ_{300} = Lectura del cuadrante a 300 rpm

μ_P = Viscosidad plástica (Poise o cP)

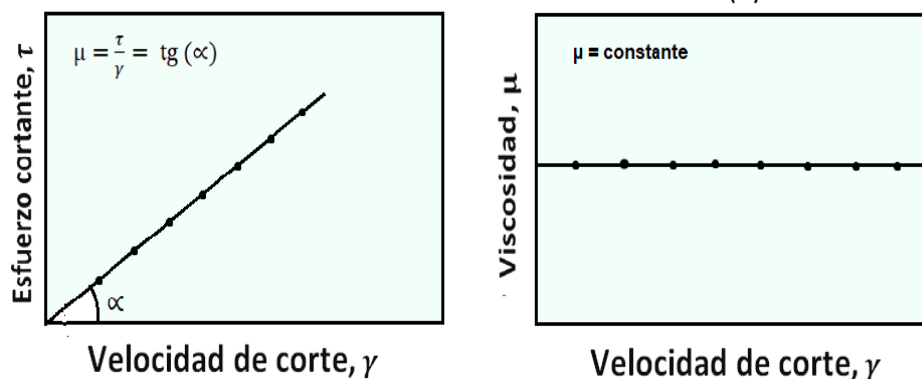
2.4.3.4. REOLOGÍA

Es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia, tomando ciertas medidas de un fluido, es posible determinar las condiciones en el cual fluirán determinados fluidos, incluyendo la presión, temperatura y velocidad de corte.

2.4.3.4.1. FLUIDOS NEWTONIANOS

Newton considera que la curva equivalente para un flujo ideal sería una línea recta que parte del origen de los ejes como se ve en la figura 6 (A), por lo tanto, los fluidos son newtonianos cuando la viscosidad está influenciada por la temperatura y presión. Sus viscosidades son absolutas debido a que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte es constante como se puede ver en la figura 6 (B).

FIGURA 6: A) Representación gráfica de un Fluido Newtoniano, B) Curva de viscosidad: viscosidad versus velocidad de corte



Fuente: Modificado en base a (Vieira, 2002)

2.4.3.4.2. FLUIDOS NO NEWTONIANOS

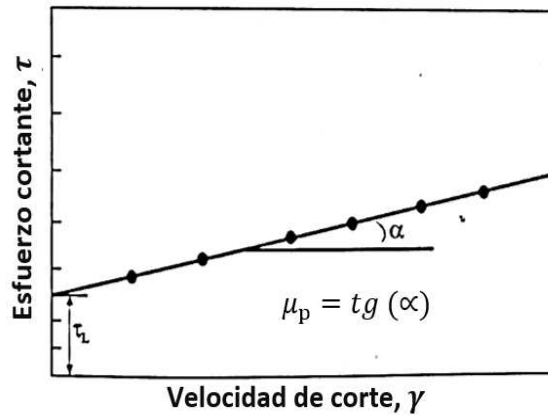
Son considerados así todos los fluidos, cuya relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad cortante no es constante, considerando una presión y temperatura constante.

Cuando los sólidos interactúan con la fase líquida, solvando o hinchándose son ejemplos de fluidos newtonianos, algunos de los fluidos no newtonianos en la industria petrolera son dispersiones de arcilla en agua, emulsiones concentradas de aceite en agua, fluidos gelificantes utilizados en operaciones de perforación. (Vieira, 2002)

2.4.3.4.2.1. MODELO DE BINGHAM O PLÁSTICO IDEAL

Requieren de la aplicación de un esfuerzo mínimo denominado límite de fluencia, de modo que haya cierta deformación por cortante, cuando se lo somete a una tensión menor que el límite de flujo, los fluidos Binghamianos se comportan teóricamente como sólidos. En la figura 12 se muestra la representación gráfica del modelo de Bingham.

FIGURA 7: Modelo de Bingham



Fuente: Modificado en base a (Vieira, 2002)

La ecuación matemática de un fluido Bingham viene dada por:

Ecuación de modelo Bingham

$$\tau = \mu_p \gamma + \tau_L \quad \text{para } \tau > \tau_L \quad (6)$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para } \tau \leq \tau_L \quad (7)$$

Fuente: (Vieira, 2002)

Donde:

τ = Esfuerzo de corte (lb/100 pie²)

μ_P = Viscosidad plástica (cP)

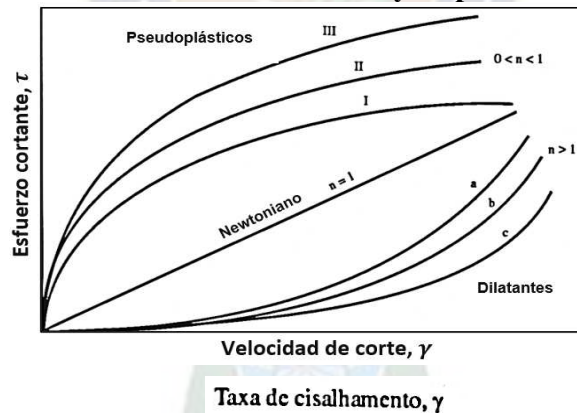
τ_L = Punto cedente (lb/100 pie²)

γ = Velocidad de corte (seg⁻¹)

2.4.3.4.2.2. MODELO DE LEY EXPONENCIAL

El modelo exponencial no se aplica a cada uno de los fluidos, ni a todos los rangos de velocidad de corte, sin embargo, existe un número limitado de fluidos no newtonianos que exhiben este comportamiento, asimismo, no supone una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, sin embargo, la curva del esfuerzo de corte y velocidad de corte obedecen a la Ley exponencial que pasa por el punto de origen, como se ve en la figura 13.

FIGURA 8: Modelo de Ley Exponencial



Fuente: (Vieira, 2002)

Las curvas III, II y I, corresponde a valores donde el índice de comportamiento (n) son menores que uno y mayores que cero, los fluidos que se comportan de esta manera se denominan pseudoplásticos. Las curvas a, b, c cuyo valor de índice de comportamiento (n) son mayores que uno, se denomina dilatantes.

- Pseudoplásticos: Son aquellos fluidos donde el incremento en el esfuerzo cortante decrece conforme incrementa la velocidad de corte, es decir, disminuyen su viscosidad mientras más fuerza se aplique sobre ellos.
- Dilatantes: Estos fluidos tienen un comportamiento totalmente opuesto a los pseudoplásticos, en este tipo de fluidos la viscosidad incrementa cuando incrementa la fuerza aplicada sobre ellos, es decir la viscosidad incrementa cuando incrementa la fuerza aplicada sobre ellos.

La ecuación de un modelo exponencial viene dada por las siguientes ecuaciones:

Ecuación del modelo de Ley Exponencial

$$\mu_a = K (\gamma)^{n-1} \quad (8)$$

Fuente: (Vieira, 2002)

Donde:

$\mu_a =$ Esfuerzo de corte (lb/100 pie²)

$K =$ Índice de consistencia

$\gamma =$ Velocidad de corte (seg⁻¹)

$n =$ Índice de comportamiento

Ecuación de índice de comportamiento

$$n = \frac{\log\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\log\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)} \quad (9)$$

Fuente: (Vieira, 2002)

Donde:

$n =$ Índice de comportamiento

$\tau_2 =$ Esfuerzo de corte a una velocidad de corte mas alta

$\tau_1 =$ Esfuerzo de corte a una velocidad de corte mas baja

$\gamma_2 =$ Velocidad de corte mas alta

$\gamma_1 =$ Velocidad de corte mas baja

Ecuación de índice de consistencia

$$K = \frac{\tau_2}{\gamma_2^n} \quad (10)$$

Fuente: (Vieira, 2002)

Donde:

$n =$ Índice de comportamiento

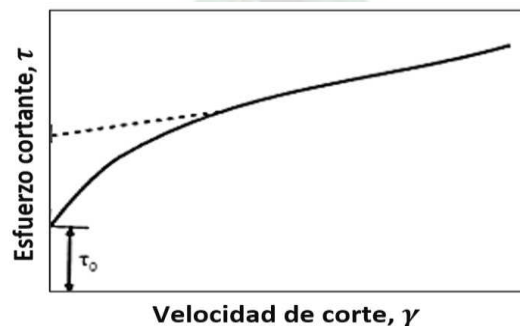
$\tau_2 =$ Esfuerzo de corte a una velocidad de corte mas alta

$\gamma_2 =$ Velocidad de corte mas alta

2.4.3.4.2.3. MODELO DE HERSCHELL – BUCKLEY

Este modelo tiene tres parámetros reológicos, por lo que se le denomina modelo de tres vías, es más completo que los modelos mencionados anteriormente, este tipo de fluido es una extensión del fluido exponencial más un nuevo parámetro denominado “Limite de flujo real” como se puede ver en la figura 9.

FIGURA 9: Modelo de Herschell - Buckley



Fuente: Modificado en base a (Vieira, 2002)

La ecuación de un modelo exponencial viene dada por las siguientes ecuaciones:

Ecuación del modelo de Herschell – Buckley

$$\tau = K (\gamma)^n + \tau_o \quad \text{para } \tau > \tau_o \quad (11)$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para } \tau \leq \tau_o \quad (12)$$

Fuente: (Vieira, 2002)

Donde:

n = Índice de comportamiento

K = Índice de consistencia

τ = Esfuerzo de corte

γ = Velocidad de corte (seg^{-1})

τ_o = Limite de rendimiento real

2.4.3.4.3. POROSIDAD PROMEDIO DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

El cálculo para la porosidad promedio del fluido de perforación está dada por la ecuación (13):

$$\varepsilon = \frac{\frac{m_{wet}}{m_{dry}} - 1}{\frac{m_{wet}}{m_{dry}} - 1 + \frac{\rho_f}{\rho_s}} \quad (13)$$

El valor de ε no debe pasar la unidad, cuanto más cercano al valor 0 este significa que el fluido es demasiado viscoso.

2.5. ESTABILIDAD DE POZOS

La estabilidad de pozos es una rama de la ingeniería de petróleos que relaciona conceptos de geología estructural, geomecánica, sedimentología, perforación de pozos, completamiento de pozos, producción, química del petróleo, petrofísica, ingeniería de yacimientos y simulación de yacimientos para analizar, prevenir y mitigar cualquier tipo de problema no deseado a lo largo de la vida de un yacimiento petrolero, ya sea, en la perforación de pozos, en algún trabajo de

completamiento como un fracturamiento hidráulico o una acidificación, durante la producción e inclusive en la etapa de recobro mejorado.

La aplicación de planes de prevención y remediación realizados con los conocimientos de estabilidad de pozos disminuirá estos problemas y mejoraran el rendimiento en la perforación, eliminando así los excesivos costos de perforación. Es importante recalcar que la inestabilidad de pozos es el desafío más crítico que afecta la perforación y la producción debido a que es la mayor causa de los tiempos no productivos (NPT).

Algunos de los problemas relacionados a la inestabilidad de pozos son el colapso de pozo, pérdidas de circulación, pegas de tubería y arenamiento los cuales se pueden encontrar en formaciones de arenas. Estos problemas pueden generar grandes pérdidas económicas a la industria petrolera. Los ingenieros han clasificado estos en dos grandes grupos: factores controlables y factores incontrolables o de origen natural.

2.5.1. ESTABILIDAD MECÁNICA

La presión hidrostática ejercida por el fluido de perforación normalmente está diseñada para exceder las presiones de formación existentes. El resultado deseado es el control de las presiones de formación y un pozo mecánicamente estable. En muchos casos, estos factores, según Hugues, también deben ser considerados:

- Comportamiento de las rocas bajo tensión y sus características de deformación relacionadas
- Formaciones con buzamiento pronunciado
- Alta actividad tectónica
- Formaciones sin fuerza cohesiva (falta de cementación de grano adecuada)

- Alta velocidad del fluido
- Angulo y acimut del agujero

2.5.2. ESTABILIDAD QUÍMICA

Las interacciones químicas entre las formaciones expuestas del pozo y el fluido de perforación son un factor importante en la estabilidad del pozo. La hidratación de la formación del pozo puede ser la causa principal de la inestabilidad de las formaciones del pozo, o un factor contribuyente. Los fluidos de perforación acuosos, según Hugues, normalmente usan una combinación de:

- Un mecanismo de recubrimiento (encapsulación).
- Un método mecánico o químico para prevenir la transmisión de la presión intersticial.

El uso actual de fluidos bajos en solidos/no/dispersos incorpora estos principios. Se basan en polímeros y sales solubles para inhibir el hinchamiento y la dispersión. Los polímeros de uso común incluyen:

- Derivados de polisacáridos para control de filtración.
- Poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas para encapsulación.

2.5.3. CAUSAS DE LA INESTABILIDAD DE POZOS

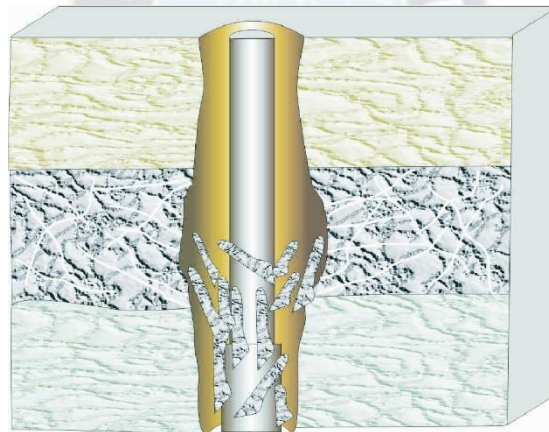
2.5.3.1. FACTORES INCONTROLABLES (NATURALES)

Los factores incontrolables o factores de origen son aquellos factores que no son generados durante las operaciones, por ejemplo, las características de la formación, los esfuerzos del subsuelo y todo lo relacionado con la naturaleza de la roca. A través del tiempo los ingenieros han desarrollado diferentes estrategias para ayudar a estabilizar las formaciones que presentan problemas de inestabilidad debido a estos factores. (wellbore instability: causes and consequences , 2007)

2.5.3.1.1. FORMACIONES NATURALMENTE FRACTURADAS O FALLADAS

Un sistema de fracturas naturales en la roca a menudo puede ser encontrado cerca a fallas. La roca cerca de las fallas se puede romper en trozos grandes o pequeños. Estos trozos de roca pueden caer dentro del pozo y atascar la sarta de perforación. Aun si los trozos están unidos entre sí, los impactos desde el ensamble de fondo de pozo BHA (Bottom Hole Assembly) debido a las vibraciones de la sarta perforación pueden causar que la formación caiga dentro del pozo. Las vibraciones de la sarta de perforación tienen que ser minimizadas para ayudar a estabilizar estas formaciones. (wellbore instability: causes and consequences , 2007)

FIGURA 10: Perforación a través de formaciones naturalmente fracturadas o



falladas

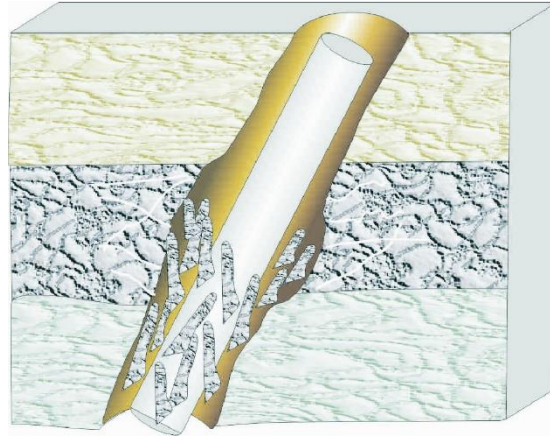
Fuente: (BORIVOJE PAŠIĆ N. G.-M., 2007)

2.5.3.1.2. FORMACIONES ESTRESADAS TECTÓNICAMENTE

La inestabilidad de pozos es causada cuando formaciones con altos esfuerzos son perforadas y existe una diferencia significativa entre los esfuerzos cercanos a la cara del pozo y la presión de restricción proporcionada por la densidad del fluido de perforación. Los esfuerzos tectónicos se acumulan por la densidad del fluido de perforación. Los esfuerzos tectónicos se acumulan en áreas

donde la roca está siendo comprimida o estirada debido al movimiento de la corteza terrestre.
(BORIVOJE PAŠIĆ N. G.-M., 2007)

FIGURA 11: Perforación a través de formaciones estresadas tectónicamente



Fuente: (wellbore instability: causes and consequences , 2007)

2.5.3.1.3. ALTOS ESFUERZOS IN SITU

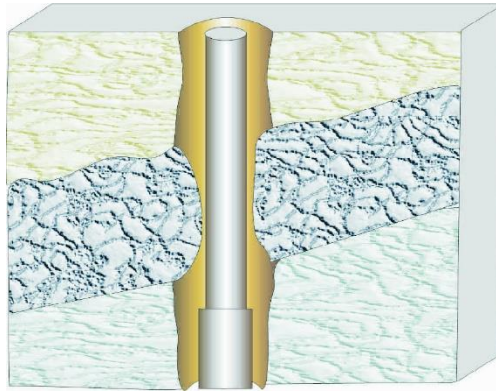
Esfuerzos in situ anormalmente altos pueden causar graves problemas de inestabilidad de pozos, los cuales pueden ser encontrados en la vecindad de domos salinos, cerca de fallas, o zonas con plegamientos. Esta concentración de esfuerzos también puede ocurrir en rocas particularmente rígidas como conglomerado y areniscas. Solo pocos casos de estudios han sido descritos por este mecanismo, principalmente por su dificultad en la medición y estimación de tales esfuerzos in situ.

2.5.3.1.4. FORMACIONES MÓVILES

El problema para los ingenieros en este tipo de formaciones, es que una formación móvil puede presionar la cara del pozo debido a que es comprimida por las fuerzas de sobrecarga. Las formaciones móviles se comportan de una manera plástica, es decir, se deforman bajo presión. Estas deformaciones resultan en una disminución en el tamaño del pozo, causando problemas en la corrida del BHA, de las herramientas de registros y del revestimiento. Una deformación ocurre porque el peso del lodo no es suficiente para prevenir que la formación entre en la cara del pozo.

Este mecanismo normalmente ocurre mientras se perforan formaciones salinas. (BORIVOJE PAŠIĆ N. G.-M., 2007)

FIGURA 12: Perforación a través de formaciones móviles

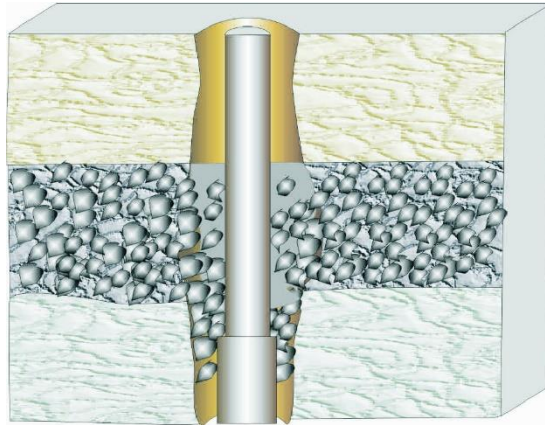


Fuente: (wellbore instability: causes and consequences , 2007)

2.5.3.1.5. FORMACIONES NO CONSOLIDADAS

Una formación no consolidada tiende a romper la cara del pozo cayendo en él, básicamente porque sus partículas están poco compactadas entre sí y ninguna unión entre partículas. El colapso de las formaciones es causado por la eliminación de la roca de soporte mientras el pozo es perforado. Esto ocurre cuando el pozo no presenta o presenta muy poca torta de lodo. Es las formaciones poco consolidadas nos e pueden utilizar sobrebalance hidrostáticos, simplemente porque el fluido de perforación fluye dentro de la formación. Este mecanismo es normalmente asociado con formaciones someras. Una adecuada torta de lodo es requerida para ayudar a estabilizar esta formación. (BORIVOJE PAŠIĆ N. G.-M., 2007)

FIGURA 13: Perforación a través de formaciones no consolidadas



Fuente: (wellbore instability: causes and consequences , 2007)

2.5.3.2. FACTORES CONTROLABLES

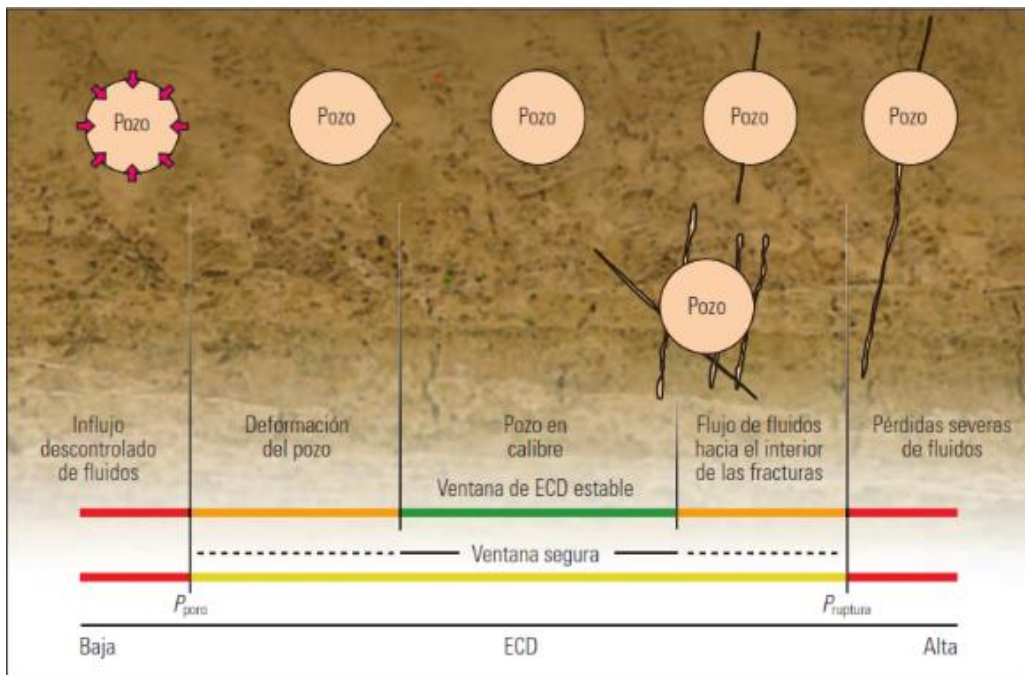
Los factores controlables son aquellos factores que pueden ser controlados durante las operaciones, los cuales son productos de malos cálculos o errores humanos. Los problemas de inestabilidad de pozos causados por estos factores pueden resultar hasta en la pérdida del pozo lo que genera elevados costos a las empresas. A través del tiempo los ingenieros han desarrollado diferentes técnicas, guías y estrategias para evitar y mitigar los problemas causados por estas causas.

2.5.3.2.1. PRESIÓN DE FONDO (DENSIDAD DE LODO DE PERFORACIÓN)

Dependiendo de la aplicación, la presión de fondo, la densidad del lodo o ya sea la densidad equivalente de circulación ECD (equivalent circulating density) suelen ser el factor determinante más importante para saber si un pozo abierto es estable. La presión de soporte ofrecida por la presión del fluido estática o dinámica durante la perforación, la estimulación o la producción de un pozo, determinará la concentración de esfuerzo presentes en las cercanías de la cara del pozo. Debido a que la falla en la roca depende de los esfuerzos efectivos, entonces la estabilidad depende de gran medida de sí y con qué rapidez la presión del fluido penetre las paredes de la cara del pozo. Una alta densidad de lodo o una alta presión de fondo siempre serán óptimas para evitar

inestabilidades en un pozo dado. En ausencia de una eficiente torta de lodo, como en formaciones fracturadas, un aumento en la presión de fondo puede ser perjudicial para la estabilidad y puede comprometer otros criterios, por ejemplo, el daño a la formación, las pegas diferenciales y las propiedades del lodo.

FIGURA 14: EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN EN LOS ESFUERZOS EN LA PARED DE LA CARA DEL POZO

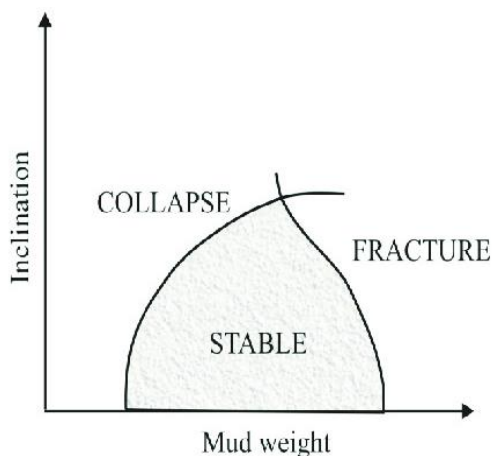


Fuente: "Estabilización de pozos para pérdidas de circulación" - oilfield review, 2012

2.5.3.2.2. INCLINACIÓN Y AZIMUT DEL POZO

La inclinación y la orientación azimutal de un pozo con respecto a los esfuerzos principales in situ puede ser un factor importante que afecte el riesgo de que ocurra un colapso o una fractura. Esto es particularmente cierto para la estimación de la presión de fractura en regiones tectónicamente activas ya que en estas zonas hay fuerte anisotropía en los esfuerzos.

FIGURA 15: EFECTO DE LA INCLINACIÓN Y DEL PESO DEL LODO EN LA ESTABILIDAD DE POZOS



Fuente: (wellbore instability: causes and consequences , 2007)

2.5.4. PRINCIPALES PROBLEMAS DE LA ESTABILIDAD DE POZOS

Se ha descubierto que además de tener una buena comprensión y entendimiento de las causas que generan los problemas de estabilidad de pozos, es necesario tener un conocimiento más particular y exacto de los problemas a los que se enfrentan en cualquier etapa de la vida del yacimiento, por ejemplo, pérdidas de circulación, producción de arena y colapso de la formación.

2.5.4.1. PERDIDAS DE CIRCULACIÓN

Las pérdidas de circulación es un fenómeno en el que el fluido o el lodo de perforación fluye parcial o completamente hacia una formación a través de zonas denominadas zonas de pérdidas de circulación o zonas ladronas, generando altos costos y riesgos significativos para los perforadores de todo el mundo.

2.5.4.2. PRODUCCIÓN DE ARENA

Cuando los hidrocarburos son producidos, las partículas sólidas en ocasiones siguen al fluido de yacimiento dentro del pozo, este indeseado subproducto de la producción de hidrocarburos es denominado como producción de sólidos.

La cantidad de sólidos producidos puede variar desde unos pocos gramos por metro cúbico de fluido de yacimiento, lo que representa unos problemas menores, hasta cantidades catastróficas que posiblemente pueden conducir al llenado completo del pozo. Los ingenieros de petróleo han estimado que el 70% de las reservas mundiales de hidrocarburos están contenidas en yacimientos donde la producción de sólidos es probable que se convierta en un problema en algún punto en el tiempo. Este problema es más pronunciado en yacimiento de arenas, por lo tanto, la producción de arena ha atraído más la atención de los ingenieros.

2.5.4.3. COLAPSO DE LA FORMACIÓN

Este problema ocurre principalmente en la etapa de perforación de pozos, cuando el esfuerzo radial es menor que el esfuerzo tangencial, provocando que la cara pozo falle bajo compresión. Este inconveniente puede ocurrir en cualquier tipo de formación.

2.6. DESCRIPCIÓN DE LOS PROBLEMAS DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN

2.6.1. TIPOS DE PERDIDAS DE CIRCULACIÓN

Las pérdidas de circulación se pueden presentar en cualquier momento de la perforación, es importante identificar la zona donde ocurren las pérdidas de circulación. Se pueden identificar las pérdidas de circulación, revisando los niveles en los tanques, mediante registros de pozo y pruebas de presión, así mismo se relaciona directamente el volumen de la pérdida con el tratamiento que se va a emplear, ya sea para pérdidas severas, se utilizarán aditivos y materiales en un volumen y concentración mayor al que se aplicarían a una pérdida parcial

2.6.1.1. PERDIDAS NATURALES

Las pérdidas de circulación de origen natural, son pérdidas que se dan por propiedades y características netamente de las formaciones, donde el factor humano no influye. La mayoría de

empresas de servicios categorizan estas pérdidas de circulación, pero en general son nombradas de manera estándar, según MI Swaco, entre otras, este grupo abarca las causas de pérdidas de circulación que se dan por problemas naturales de la formación como:

- Formaciones no consolidadas.
- Formaciones fracturadas naturalmente.
- Formaciones cavernosas.
- Formaciones con alta permeabilidad.
- Formaciones falladas.

2.6.1.2. PERDIDAS INDUCIDAS

Este grupo abarca las causas de pérdidas de circulación que se dan por problemas como:

- Excesivas presiones de fondo.
- Malas técnicas de perforación.
- Densidad de lodo excesiva.
- Exceso de viscosidad del fluido de perforación.
- Aumento del ECD por carga anular.
- Fracturas inducidas.
- Perforación dentro de formaciones depletadas.

Cuando ocurren las pérdidas de circulación, se deben revisar algunos parámetros de la perforación como son, el torque, ROP, las velocidades de viaje, análisis de recortes, su volumen, forma y tamaño, ya que esto podría alertar sobre una posible falla, aparte de esto se evalúa la limpieza del pozo y la estabilidad del mismo.

2.6.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN

Es importante distinguir que las pérdidas de circulación se pueden clasificar por el caudal de fluido perdido o, según la presión dentro de la zona.

2.6.2.1. SEGÚN LA SEVERIDAD DE LAS PÉRDIDAS

En esta clasificación general se tienen tres categorías, las cuales son:

- **Pérdidas por filtración:** este tipo de pérdidas son las de menor caudal, ya que su rango oscila entre 1-19 bbl/hr, este rango en ocasiones hace que se crea que el volumen perdido es por retirar los sólidos al lodo.
- **Pérdidas parciales:** son un poco más grandes que las de filtrado, aquí se pueden perder caudales de fluido de alrededor de 20-60 bbl/hr, en muchas ocasiones se continúa la perforación y se controlan las pérdidas con una píldora especial para detener las pérdidas de fluido.
- **Pérdidas severas o totales:** este tipo de pérdida sucede cuando el caudal de fluido perdido es mayor a 60 bbl/hr incluso llegando a no haber retorno en caso de pérdidas totales, en presencia de este tipo de pérdidas se debe recuperar el control del pozo y luego buscar un tratamiento remedial.

2.6.2.2. SEGÚN LAS PRESIONES DENTRO DE LA ZONA

La presión en la zona de pérdida de circulación puede ser determinada de acuerdo a la cantidad de fluido que se tiene desde el tope del pozo, se debe tener presente que el fluido de perforación debe estar estable entre los rangos de la presión de fractura y la presión de la formación, ya que, al exceder la presión de fractura, se pueden inducir fracturas ocasionando pérdidas hacia la formación.

2.6.3. CONSECUENCIAS DE LAS PERDIDAS DE CIRCULACIÓN

Las consecuencias concebidas por las pérdidas de circulación pueden ser divididas en cuatro tipos principales: Daño de perforación, Infiltración, **Incremento en los costos de perforación** y Pega de tubería.

2.6.4. ADITIVOS DE CONTROL DE PÉRDIDA POR FILTRADO

Diferentes aditivos son utilizados para el control de filtración en fluidos de perforación base agua, su uso dependerá de las condiciones requeridas y de su ambiente químico.

2.6.4.1. ARCILLAS

La bentonita es uno de los aditivos más usados en la formulación del fluido de perforación con buenas propiedades de revoque y control de filtración, asimismo puede incrementar la viscosidad del fluido, cualquier concentración superior a 7,5 lb/bbl proporcionara buenas características de filtración y un buen revoque.

2.6.4.2. POLÍMEROS

Son capaces de proporcionar control de filtración a elevadas temperaturas y en condiciones adversas, no solo viscosifican la fase fluida, sino también se adsorben en los sólidos del fluido de perforación cuando esta se usa a una concentración mayor, asimismo se toma debidas precauciones al agregar polímeros debido a que esta puede reaccionar con otros productos químicos contenidos en el fluido de perforación (Energy API, 2001)

Los aditivos utilizados en fluidos de perforación para el control de filtrado se presentan en la tabla 4.

TABLA 4: ADITIVOS PARA EL CONTROL DE FILTRADO

ADITIVOS		
TIPO	ADITIVO	CARACTERÍSTICAS
Arcilla	Bentonita	Proporciona buenas propiedades de revoque y filtrado
		A concentraciones mayores a 7,5 lb/bbl proporciona buenas bases para el revoque y características de filtración
Polímeros	Almidón de maíz	Concentración varía entre 3 a 8 lb/bbl según la composición química del agua y la pérdida de filtrado deseada
	Almidón de papa	Eficaz para perforar secciones de sal y lutita hidratable a temperaturas menores de 250°F
		las concentraciones varían entre 2 a 6 lb/bbl según la composición química del agua y la pérdida de filtrado deseada
	Carboximetilcelulosa de sodio (CMC)	Eficaz para el control de filtrado en lodos base agua
		No sujeta a degradación por actividad antibacteriana
		Degradación térmica a temperaturas mayores a 250°F
		CMC de baja viscosidad para el control de filtrado
	Celulosa Polianiónica	utilizado en sistemas de fluidos base agua
		Degradación térmica a temperaturas mayores a 275 °F
	Poliacrilonitrilo de sodio	Estable a temperatura elevadas
		Limitar el uso cuando se tiene lodos con contenido de calcio
	Resinex	Control de pérdida de filtrado no viscosificante
		Estabiliza las propiedades reológicas del lodo base agua
Controlador de pérdida de filtrado hasta temperaturas > 400°F		
Thermex	Puede usarse a temperaturas mayores 400°F	

Fuente: (Energy API, 2001)

2.7. MATERIALES A BASE DE FIBRAS NATURALES Y ADITIVOS

BIODEGRADABLES

La industria petrolera se inclina hacia prácticas más respetuosas con el medio ambiente. Los reglamentos ambientales que gestionan la eliminación de los residuos de perforación motivan a la

industria a poder ser más eficientes con las operaciones de perforación. Los aditivos ecológicos utilizados en los fluidos de perforación durante las operaciones de perforación no solo reducen las implicaciones negativas hacia el medio ambiente, sino que más importante aún reducen los costos de operación. Los datos experimentales en este proyecto incluyen los efectos de agregar estos materiales de desecho en las propiedades del fluido de perforación, como el peso del lodo, la filtración y la reología. El peso del lodo se midió usando un balance de lodo, los datos de filtración se recolectaron usando un filtro prensa API y para la reología se usó un viscosímetro Fann. (Al-Hameedi, 2019)

El presente proyecto proporcionara un conjunto de datos experimentales sobre la utilización de materiales de desecho biodegradables como aditivos para fluidos de perforación que no dañen el medio ambiente. Los materiales de desechos a los cuales se le realizo unas evaluaciones experimentales son: la caña de azúcar, corteza de cedro y polvo de hierba.

2.7.1. CEDRO

Árbol que alcanza entre los 30 a 40 m de altura, la corteza del tronco es de color café y fisurada con un espesor de 2 cm. En algunos casos, estos materiales de desecho se convierten en leña. La mayor parte de la corteza no tiene un fin de ningún tipo en su uso. Por lo tanto, resulta en una fuente sostenible.

Pennington, T. y Sarukhan, J. mencionan que, es una especie abundante en la vegetación secundaria de diversas selvas y constantemente protegida por el hombre. Se desarrolla igualmente en suelos de origen volcánico a calizo, siempre que tengan buen drenaje. El cedro alcanza su máximo tamaño e incremento en la zona con precipitación entre 2.500 - 4.000 mm/anales. En zonas con precipitaciones pluviales notablemente menores. El árbol no desarrolla bien y presenta

fustes cortos y frecuentemente torcidos. Es corriente utilizar cedro en zonas de cultivo como árboles de sombra y se le usa mucho como árbol ornamental en varias poblaciones de la zona tropical. (CÁCERES, 2008)

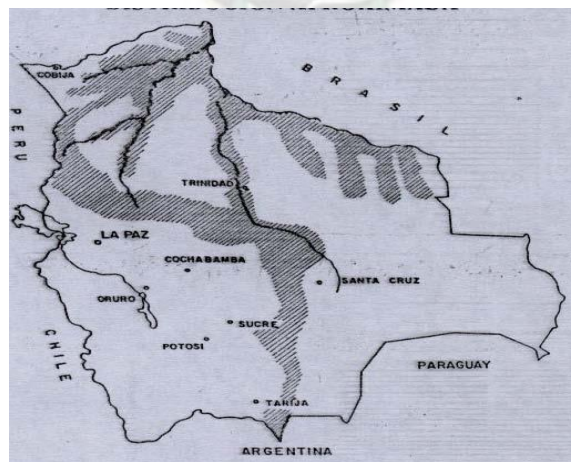
FIGURA 16: ÁRBOL DE CEDRO



Fuente: (CÁCERES, 2008)

Es una especie oportunista en Alto Beni se encuentra distribuida entre 400 y 600 m.s.n.m. en bosques submontanos, con poca frecuencia en bosques de transición amazónica y rara vez en bosques montano húmedos, en suelos profundos comúnmente franco arenosos y moderadamente ondulados.

FIGURA 17: LA DISTRIBUCIÓN DEL CEDRO EN BOLIVIA



Fuente: (Silverio Viscarra Altamirano, 1992)

Distribución del cedro en Bolivia (Fig. 16). Ubicación geográfica, el área de donde se obtuvo el material para su estudio en laboratorio, comprende una región de bosques de la provincia Larecaja en el departamento de La Paz a una altura 900 m.s.n.m. Se encuentra ubicado en el municipio de Guanay segunda sección de la provincia Larecaja. Limita al norte con la provincia Franz Tamayo, al este con las provincias Sud Yungas y Caranavi, al sur con la provincia Murillo y con la provincia Los Andes, al oeste con la primera sección Tipuani, al noroeste con la comunidad de Consata. (CÁCERES, 2008)

2.7.2. CAÑA DE AZÚCAR

Se puede llegar a describir a la caña de azúcar como una planta herbácea, del tallo subterráneo brotan los tallos aéreos de 5 a 12 pies de altura y de tres pulgadas de diámetro, divididos por nudos, de donde brotan las hojas que son alternas, rectinervas y envainadas en la base y provistas de lígula. La parte del tallo comprendida entre dos nudos se denomina canuto. En el nacimiento de cada hoja existe una yema de forma ovoidal cubierta de escamas, la inflorescencia en espigas compuestas y el fruto es un cariopse muy pequeño. (Luís Fernández T, 2015)

FIGURA 18: CAÑA DE AZÚCAR



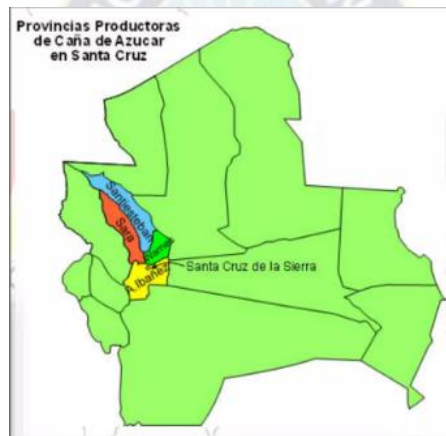
Fuente: (Fertiglobal, 2021)

Zonas de producción

Las zonas de cultivo de caña de azúcar, mas importantes en Bolivia se hallan en los departamentos de santa cruz y Tarija, donde se cultiva prácticamente la totalidad de la producción nacional.

El área de producción en el departamento de santa cruz se ubica en las provincias: Andrés Ibañes, municipios de santa cruz de la sierra, Cotoca, el torno, la guardia, Santiesteban en los municipios de Saavedra, mineros, montero y Alonzo Fernández.

FIGURA 19: ÁREA DE PRODUCCIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE SANTA CRUZ



Fuente: (AEMP, 2010)

La zona de producción de caña de azúcar en el departamento de Tarija está ubicada en la provincia arce, más propiamente en el municipio de bermejo y parte del municipio de Padcaya.

FIGURA 20: ÁREA DE PRODUCCIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE TARIJA



Fuente: (AEMP, 2010)

Sin embargo, también existen zonas de producción en otros municipios del país como por ejemplo los municipios de Ixiamas y San buenaventura, en el departamento de La Paz, como también en los departamentos de Beni y Cochabamba.

2.7.3. HIERBA

La hierba es una planta de tamaño pequeño que presenta un tallo tierno y no leñoso. Hay hierbas que nacen de las semillas, y otras que crecen desde tallos que se encuentran en el suelo o que son subterráneos.

La hierba que cubre el terreno se conoce como césped. La que se utiliza para que el ganado se alimente, se la denomina pasto. Aun así, en el día a día y con la normalización del lenguaje dan a entender que los tres términos (hierba, césped y pasto) son lo mismo o suelen mezclarse y se usan de manera indistinta. Las hierbas herbáceas pueden surgir de manera espontánea o bien se pueden sembrar. La mayoría de las especies de hierba o pasto no presentan mucha altura y las raíces no suelen ser muy profundas generando un tapiz herbáceo diverso y denso. Esta especie presenta una gran adaptación al pastoreo o a la siega. Perteneciendo fundamentalmente a dos grandes familias las cuales son: las gramíneas y las leguminosas. (Creaf, 2020).

FIGURA 21: HIERBAS GRAMÍNEAS Raygras inglés perenne (*Lolium perenne*)



Fuente: (tierra.com, 2020)

FIGURA 22: HIERBAS LEGUMINOSAS



Fuente: (CIAM, 2020)

2.8. HIDRÁULICA DE PERFORACIÓN

La hidráulica es la parte definida como el estudio de las propiedades de fluidos estáticos o dinámicos. La hidráulica de perforación toma un papel importante en la operación de circulación del fluido de perforación a través de los espacios interior y anular, en la tasa de penetración y la limpieza del pozo.

2.8.1. ÍNDICE DE CONSISTENCIA Y DE FLUJO

➤ Espacio interior

Ecuación de “n”

$$n_p = 3,32 \log \left(\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right) \quad (14)$$

Fuente: (Energy API, 2001)

Ecuación de “k”

$$k_p = 5,11 \left(\frac{\theta_{600}}{1.022^{n_p}} \right) \quad (15)$$

Fuente: (Energy API, 2001)

➤ Espacio anular

Ecuación de “n”

$$n_a = 0,657 \log \left(\frac{\theta_{100}}{\theta_3} \right) \quad (16)$$

Fuente: (Energy API, 2001)

Ecuación de “k”

$$k_a = 5,11 \times \frac{\theta_3}{(5,11^{n_p})} \quad (17)$$

Fuente: (Energy API, 2001)

2.8.2. VELOCIDAD MEDIA

Según Energy API, (2001) la velocidad del fluido que fluye dentro del espacio interior y anular se refiere a velocidad de propagación en el medio, es decir, que la totalidad del fluido fluye a la misma velocidad con un perfil plano sin las diferencias de velocidad que se produce en el flujo turbulento

➤ Espacio interior

Ecuación de velocidad de media

$$V_p = \frac{24,48 \times Q}{ID^2} \quad (18)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

$Q =$ Caudal (gpm)

$ID =$ Diametro interno de la tuberia (in)

➤ Espacio anular

Ecuación de velocidad media

$$V_a = \frac{24,48 \times Q}{ID_{HY}^2 - OD_P^2} \quad (19)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

$Q =$ Caudal (gpm)

$OD =$ Diametro externo de la tuberia (in)

$ID_{HY} =$ Diametro interno del casing (in)

2.8.3. VISCOSIDAD EFECTIVA

➤ Espacio interior

Ecuación de viscosidad efectiva

$$\mu_{ep} = 100 \times k_p \times \left(\frac{1,6 \times V_p}{ID} \right)^{(n_p-1)} \times \left(\frac{3n_p + 1}{4n_p} \right)^{(n_p)} \quad (20)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

$V_p =$ Velocidad media (pie/min)

$ID =$ Diametro interno de la tuberia (in)

➤ Espacio anular

Ecuación de viscosidad efectiva

$$\mu_{ea} = 100 \times k_a \times \left(\frac{2,4 \times V_a}{ID_{HY} - OD_P} \right)^{(n_a-1)} \times \left(\frac{3n_a + 1}{4n_a} \right)^{(n_a)} \quad (21)$$

Fuente: Energy API, (2001)

$V_a =$ Velocidad media (pie/min)

$ID =$ Diametro interno de la tuberia (in)

$ID_{HY} =$ Diametro interno del casing (in)

2.8.4. NUMERO DE REYNOLDS

Es un numero adimensional permite caracterizar el movimiento de un fluido, es decir, si es un flujo laminar o un flujo turbulento. Albarado et al., (2019)

➤ Espacio interior

Ecuación de número de Reynold

$$N_{Rep} = \frac{15,467 \times V_p \times ID \times \rho}{\mu_{ep}} \quad (22)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

V_p = Velocidad media (pie/min)

ID = Diametro interno de la tubería (in)

ρ = Densidad (lb/gal)

μ_{ep} = Viscosidad efectiva (cP)

➤ Espacio anular

Ecuación de viscosidad efectiva

$$N_{Rea} = \frac{15,467 \times V_a \times (ID_{HY} - OD_p) \times \rho}{\mu_{ea}} \quad (22)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

V_a = Velocidad media (pie/min)

ID = Diametro interno de la tubería (in)

ID_{HY} = Diametro interno del casing (in)

ρ = Densidad (lb/gal)

μ_{ea} = Viscosidad efectiva (cP)

2.8.5. FACTOR DE FRICCIÓN

Es un parámetro adimensional utilizado para calcular la pérdida de carga en una tubería debido a la fricción. Albarado et al., (2019)

➤ Espacio interior

Si $N_{Rep} \leq 2100$

Ecuación de factor de fricción

$$f_p = \frac{16}{N_{Rep}} \quad (23)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Si $N_{Rep} \geq 2100$

Ecuación de factor de fricción

$$f_p = \frac{\log n + 3,93}{50} \frac{1}{N_{Rep}^{\left(\frac{1,75 - \log n}{7}\right)}} \quad (24)$$

Fuente: Energy API, (2001)

➤ Espacio anular

Si $N_{Rep} \leq 2100$

Ecuación de factor de fricción

$$f_a = \frac{24}{N_{Rea}} \quad (25)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Si $N_{Rep} \geq 2100$

Ecuación de factor de fricción

$$f_p = \frac{\log n + 3,93}{50} \frac{1}{N_{Rep}^{\left(\frac{1,75 - \log n}{7}\right)}} \quad (26)$$

Fuente: Energy API, (2001)

2.8.6. PÉRDIDA DE PRESIÓN

Debe ser calculada separadamente para cada intervalo o sección. La ecuación 27 se usa para calcular las pérdidas de presión en el espacio interior y anular. Energy API, (2001)

➤ Espacio interior

Ecuación de pérdida de presión

$$P_p = \frac{f_p \times V_p^2 \times \rho}{92.916 \times ID} \times L_m \quad (27)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

f_p = Factor de fricción

V_p = Velocidad media (pie/min)

ρ = Densidad (lb/gal)

ID = Diametro interno de la tubería (in)

L_m = Longitud (pie)

➤ Espacio anular

Ecuación de pérdida de presión

$$P_a = \frac{f_p \times V_a^2 \times \rho}{92.916 \times (ID_{HY} - OD_p)} \times L_m \quad (28)$$

Fuente: Energy API, (2001)

Donde:

f_p = Factor de fricción

V_a = Velocidad media (pie/min)

ρ = Densidad (lb/gal)

ID_{HY} = Diametro interno del casing (in)

ID = Diametro interno de la tubería (in)

L_m = Longitud (pie)

2.8.7. DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN

La densidad equivalente de circulación es considerada como el peso efectivo del fluido circulante en el fondo de pozo, que equivale a la sumatoria del peso del fluido representado por las pérdidas de presión de circulación anular y la densidad del fluido de perforación.

Ecuación de densidad equivalente de circulación

$$ECD = \rho + \frac{P_a}{0,052 \times TVD} \quad (29)$$

Fuente: Energy API, (2001)

2.8.8. LIMPIEZA DEL POZO

La limpieza del pozo es un factor crítico durante la perforación de pozos que el fluido debe desempeñar, la falta de limpieza del pozo puede desencadenar complicaciones durante la perforación, como empaquetamiento del pozo o pega de la tubería, por el cual es importante planear y monitorear la limpieza del pozo. Energy API, (2001)

a) Velocidad de asentamiento de los recortes

Ecuación de velocidad de asentamiento de los recortes

$$V_{st} = 0,45 \times \left(\frac{PV}{\rho_L \times D_P} \right) \times \left(\sqrt{\left(\frac{36800 \times \rho_L \times D_P^3 \times (\rho_P - \rho_L)}{PV^2} + 1 \right)} - 1 \right) \quad (30)$$

Fuente: (Albarado, 2019)

Donde:

PV = Viscosidad plástica (cP)

ρ_L = Densidad del fluido de perforacion (lb/gal)

ρ_P = Densidad de los recortes (lb/gal)

D_P = Diámetro de los recortes (in)

b) Limpieza del pozo

Ecuación de limpieza del pozo

$$F_T = 1 - \frac{V_{st}}{V_a} \quad (31)$$

Fuente: López (2017)

Donde:

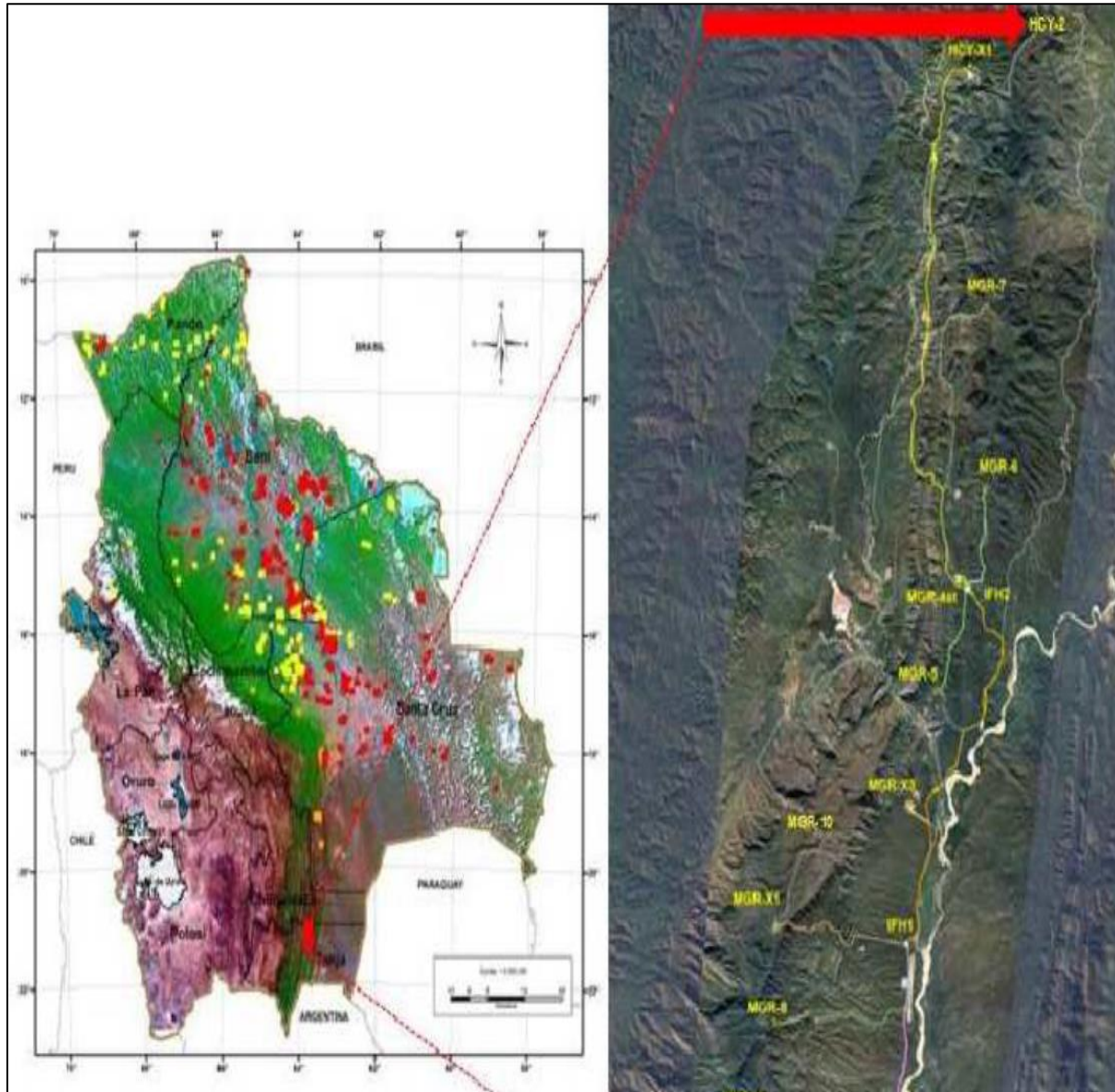
V_{st} = Velocidad de asentamiento de los recortes (psi/min)

V_a = Velocidad de flujo en el espacio anular (psi/min)

Según el autor López (2017) de la empresa JOA PETROL COMPANY, una limpieza eficiente del pozo es cuando la capacidad de acarreo de recortes es mayor que 0,6 y tiende a uno.

2.9. POZO HUACAYA 2

2.9.1. UBICACIÓN DEL POZO HCY-2



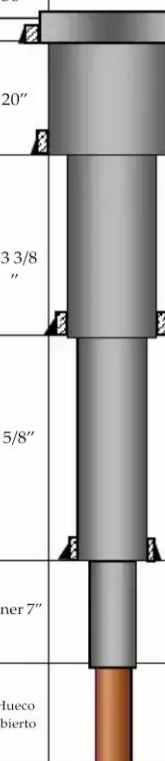
Fuente: (Programa de perforación Pozo HCY-2, 2015)

2.9.2. PROGNOSIS GEOLÓGICA

HUACAYA-2			
RT: 927 m.			
Formation	m. MD	m. TVD	m. SS
ESCARPMENT	0		
TAIGUATI	950	950	23
TARIJA	1025	1025	98
ITACUAMI	1750	1750	823
TUPAMBI	1835	1835	908
FALLA	1900	1900	973
TUPAMBI	1900	1900	973
FALLA BORORIGUA	2223		1296
ESCARPMENT	2223	2223	1296
TAIGUATI	2430	2430	1503
TARIJA	2529	2529	1602
ITACUAMI	2690	2690	1763
TUPAMBI	2800	2800	1873
FALLA	3067	3067	2140
TUPAMBI	3067	3067	2140
IQUIRI	3325	3325	2398
LOS MONOS	3570	3570	2643
HUAMAMPAMPA H1B	4290	4280	3353
ICLA	4430	4416	3489
FALLA	4581	4562	3835
LOS MONOS	4581	4562	3635
HUAMAMPAMPA H1C	4760	4731	3804
ICLA	4880	4884	3917
FALLA	5118	5068	4141
LOS MONOS	5118	5068	4141
HUAMAMPAMPA H2	5700	5614	4688
ICLA	5850	5756	4828
PF:	5900		

Fuente: (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

2.9.3. DISEÑO DEL POZO HCY-2

Diam. OH. (in)	Diam. CSG. (in)	Programa de Cañería	Prof. (MD-SS) (m)	TVD (TVD-SS) (m)	Tipo de Lodo	Problemas Potenciales	Días
36 "	30"		98 m	98 m	DRILPLEX	Inestabilidad del Pozo Limpieza del Agujero Perdidas Severas de Circulación, posibles contaminación con anhidrita.	8
24 "	20"		1500 m	1500 m	DRILPLEX AR PLUS	Inestabilidad del Pozo Tendencia a la desviación Vibración y abrasividad Perdidas Severas de Circulación, posible cont. con anhidrita.	50
17 ½ "	13 3/8 "		3570 m	3560 m	DRILPLEX AR PLUS	Riesgo de Amago de Descontrol al cruzar tramos de areniscas Tendencia a la desviación Ensanchamiento del Pozo Limpieza del Agujero Perdida de Circulación , Aprisionamiento	98
12 ¼ "	9 5/8"		4290m	4270 m	MEGADRIL	Riesgo de Amago de descontrol al cruzan tramos de areniscas Limpieza del Agujero Perdida de Circulación Aprisionamiento Se esperan zonas anormalmente presurizadas resultando en inestabilidad de las paredes.	41
8 ½ "	Liner 7"		5700 m	5622 m	MEGADRIL	Perdidas de circulación, daño a la formación	157
6"	Hueco abierto		5900 m	5800 m	MEGADRIL	Perdidas de circulación, daño a la formación, altas presiones de circulación.	57
Total							410

Fuente: (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

Continuo perforando hasta 4351m combinando arreglos con Motor Fondo- Power Pulse y ; Turbina – Power pulse. Construyendo la curva (según programa mantener los 7° inclinación y 126° de azimut hasta 3164m p/iniciar el KOP), en lo real en 3164m se llego con 10.92° y Az: 119.°, para girar lentamente y levantar ángulo hasta 29.5° y Az de 122.31° en 3708m. Manteniendo tangente hasta FP (Survey en 4333m, 29.47°; Az: 125.80). El ángulo máximo fue de 31.52°, Az: 125.25° en la profundidad de 3810m.

Se emplearon 103 días de perforación; Atravesando la falla Bororigua, repitiendo la formación Tarija; Itacuami; Tupambi; y perforando la formación Iquiri y Los Monos.

Se tuvieron perdidas de circulación severas perforando en 3360m (120bph); 4025.5m (Perdida total circulación); 4215.5m (41bph); 4240.5m (60bph); 4299m (120bph), las mismas que fueron controladas con baches sellantes y maniobras c/arreglos lisos para inyectar a formación material obturante. Vol total perdido 3385bbl lodo OBM.

Fuente: Informe final de perforacion (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

CAPITULO 3

3. APLICACIÓN PRACTICA

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo y método de investigación que presenta el presente proyecto son:

1. Tipo de investigación

- **Investigación cuantitativa:** El modelo cuantitativo generaliza y especula, para alcanzar mayor validez, se rige en la medición de ciertas variables a través de la determinación de indicadores (Cadena Iñiguez, 2017)
- **Investigación descriptiva:** La descripción del objeto permite determinar tanto las características medibles del objeto, sus propiedades características y/o perfiles de un fenómeno que se somete a análisis, se pretende únicamente medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o variables que se refieren (Fernández, 2014)
- **Investigación correlacional:** Busca establecer la relación o grado de asociación entre dos o más variables en un contexto en particular, para tal caso primero se mide cada una de las variables y después se cuantifican, analizan y establecen las vinculaciones (Fernández, 2014)

2. Método de investigación

- **Método Inductivo:** Permite justificar afirmaciones generales a un número indefinido de casos, es decir que permite realizar declaraciones generales sobre base de afirmaciones individuales y al mismo tiempo establecer afirmaciones justificadas (Andrade, 2018)

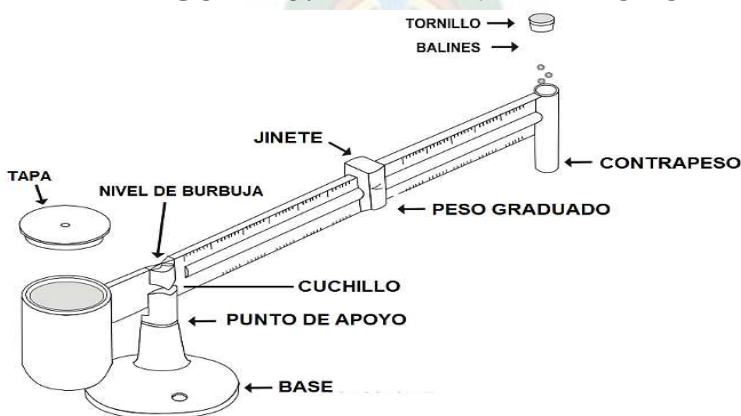
3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

El API (Instituto Americano del Petróleo) recomendó métodos estándar para la realización de pruebas y/o ensayos de campos en fluidos de perforación, las mismas que se detallaran a continuación.

3.2.1. DENSIDAD DEL FLUIDO (PESO DEL LODO)

El punto de inicio para el control de la presión es el control de la densidad del lodo. La densidad del fluido se mide con una balanza de lodo de suficiente precisión para obtener mediciones con un margen de error de 0,1 lb/gal (0,5 lb/pie³ o 5 psi/1.000 pies de profundidad), puede decirse que la densidad es el peso por el volumen unitario y se mide pesando el lodo. La balanza de lodo está constituida por una base sobre la cual descansa un brazo graduado con un vaso, tapa, cuchillo, nivel de burbuja de aire, jinete y contrapeso. En un extremo del brazo se coloca el vaso de volumen constante, el cual tiene un contrapeso en el otro extremo como se puede ver en la figura 23. El vaso y el brazo oscilan perpendicularmente al cuchillo horizontal, el cual se encuentra sobre el soporte, y son equilibrados desplazando el jinete a lo largo del brazo graduado.(Energy API, 2001).

FIGURA 23: BALANZA DE LODO



Fuente: Modificado en base a (Arteaga, 2014)

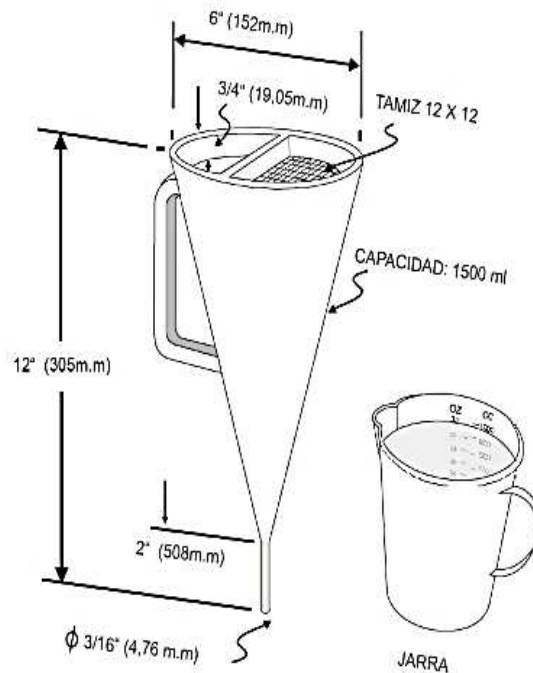
3.2.2. VISCOSIDAD

El instrumento usado para la medición de la viscosidad del lodo de perforación es el viscosímetro de Marsh, asimismo el medidor de V-G (viscosidad- gravedad) de Fann es usado para completar la información que es obtenida con el viscosímetro de Marsh, el cual puede indicar la viscosidad aparente, la viscosidad plástica, el punto cedente y los esfuerzos de gel (Energy API, 2001).

1) Viscosímetro de Marsh

El viscosímetro de Marsh tiene una longitud de 12 pulgadas, un diámetro de 6 pulgadas en la parte superior y en la parte inferior tiene un tubo de orificio liso de 2 pulgadas de largo con un diámetro de interior de 3/16 pulgada, a una distancia de 3/4 de pulgada debajo de la parte superior del embudo, se tiene una malla de tela metálica con orificios de 1/16 pulgada cubriendo la mitad del embudo como se puede ver en la figura 24 (Energy API, 2001) .

FIGURA 24: VISCOSÍMETRO DE MARSH



Fuente: PDVSA, (2002)

2) Viscosímetro Rotativo

Este tipo de viscosímetro es accionado por un motor eléctrico rotativo, el fluido de perforación se encuentra dentro del espacio anular entre dos cilindros concéntricos. El cilindro exterior o manguito de rotor es accionado a una velocidad rotacional (RPM-Revoluciones Por Minuto) constante, asimismo esta impone un torque sobre el cilindro interior o balancín el cual por medio de un resorte de torsión limita su movimiento y su desplazamiento es indicado por un cuadrante acoplado al balancín (Energy API, 2001).

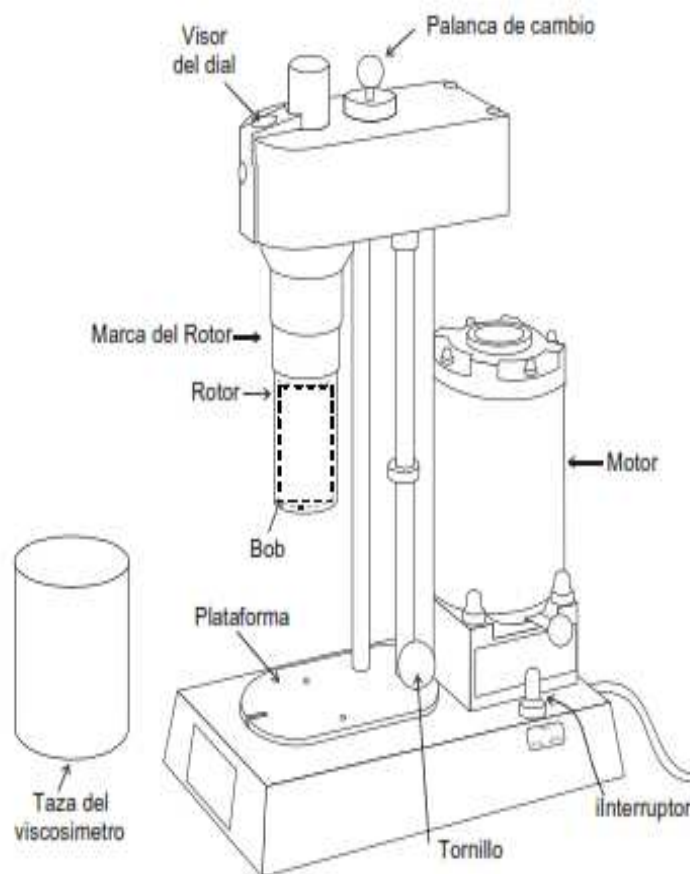
FIGURA 25: VISCOSÍMETRO DE INDICACIÓN DIRECTA



Fuente: (Energy API, 2001)

De este instrumento se puede obtener la viscosidad plástica y el punto sedente usando las indicaciones de la velocidad del manguito de rotor de 600 y 300 RPM, controladas por la palanca de selección de velocidad.

FIGURA 26: PARTES DE VISCOSÍMETRO ROTATORIO FANN 35A



Fuente: (PDVSA., 2002)

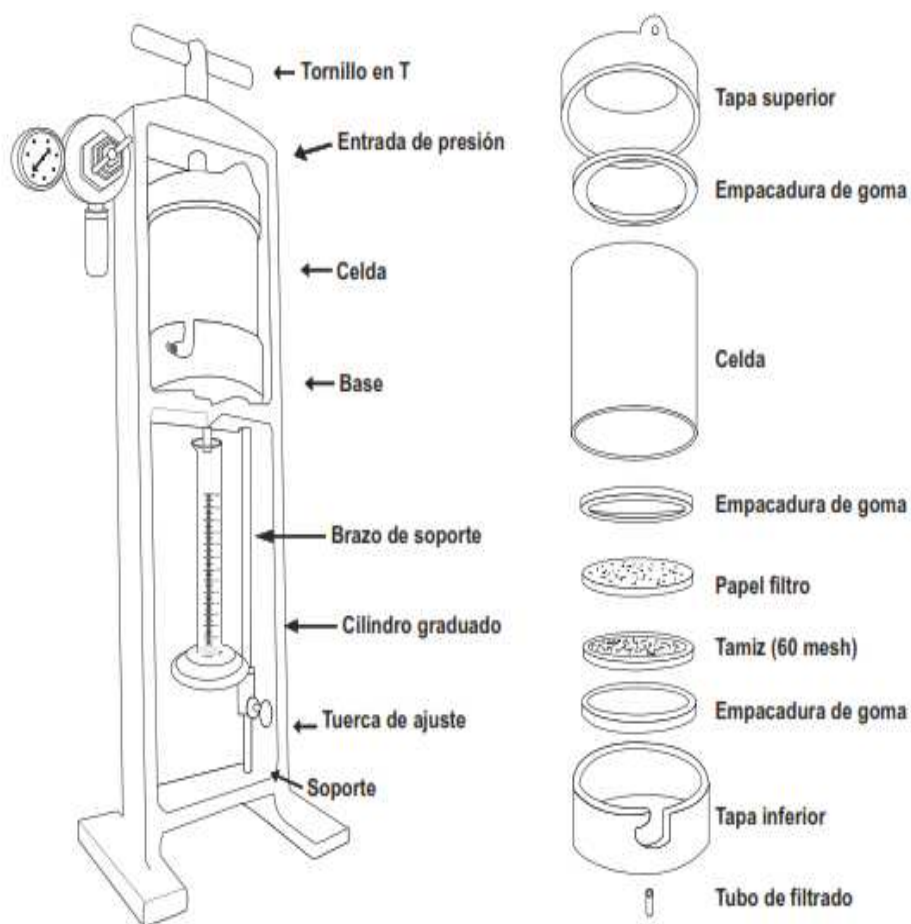
En primer lugar, se debe calibrar de la siguiente manera, paso a paso según (PDVSA., 2002):

- Medir la temperatura de calibración con un termómetro graduado a 0.1 dicha temperatura debe estar dentro del rango de tabla de viscosidad versus la temperatura que viene con el fluido.
- Llenar la taza del viscosímetro con el fluido a 100 cps hasta donde indique la marca, se debe colocar la taza hasta hacer coincidir el nivel del fluido con la marca del rotor.
- Durante 3 minutos debe estar encendido el viscosímetro a 300 rpm y 600 rpm.

3.2.3. FILTRACIÓN

La propiedad de filtración o la pérdida de agua que pasa hacia la formación permeable cuando el fluido es sometido a una presión diferencial es determinada con un filtro prensa, el cual consiste en determinar la velocidad a la cual se fuerza un fluido a través del papel filtro, la prueba se realiza bajo condiciones de tiempo, temperatura y presión especificadas, posteriormente se mide el espesor del revoque solido asentado. El filtro prensa consta de una celda de lodo, un regulador de presión y un medidor montado encima de la caja de transporte como se puede ver en la figura 24 (Energy API, 2001).

FIGURA 27: PARTES DEL FILTRO PRESA API



Fuente: (PDVSA., 2002)

3.2.4. MUDWARE ENGINEERING SOFTWARE

Con el fin de facilitar el desarrollo experimental del proyecto se tomará como herramienta el software de ingeniería “MUDWARE” de MI SWACO la cual es una colección de programas de ingeniería e información técnica relacionados con el lodo y la perforación que se proporcionan 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 finalización de un pozo. Y por la capacidad de funciones que cuenta este software es que para el presente proyecto se trabajara con los datos obtenidos en laboratorio realizando una simulación en dicho programa.

FIGURA 28: MUDWARE ENGINEERING SOFTWARE



Fuente: MI SWACO

3.3. REALIZAR UN DIAGNÓSTICO GEOLÓGICO ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN IQIRI DEL POZO HUACAYA 2

3.3.1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA FORMACIÓN IQIRI

El periodo Devónico comenzó hace 416 millones de años y terminó hace 359 millones de años aproximadamente, corresponde al cuarto periodo de la era Paleozoica. Está compuesto por más de 3000 m de sedimentos clásticos de origen marino, donde se formaron grandes plantas con raíces profundas, que promovieron la meteorización química de las rocas y sedimentos superficiales con mayor infiltración de agua de lluvia y neoformación de arcillas (Cruz, 2002).

El periodo Devónico está representado por una espesa serie sedimentaria lutítica, asimismo, está compuesto por alternancia de facies arenosas. Se da el nombre de formación Los Monos a la facies predominantemente lutíticas, de color gris oscuro a negro, y el de formación Iquiri a la facies superior muy arenosa de color gris verdoso, amarillento y rojizo.

La continuidad lateral de ciertos límites litológicos es tomada como base para la división del periodo Devónico en secuencias y conjunto de secuencias, tal es el caso de la Formación Iquiri que presenta sedimentos marinos de ambiente Nerítico, es decir, que se depositó hasta donde el oleaje tenía su accionar y allí se originó su deposición (Cruz, 2002).

La formación Iquiri del periodo Devónico, de forma general se superpone a principios del piso Givetiano medio, y a superior del piso Frasniano; se encuentra entre la formación Tupambi del Carbonífero en su parte superior y la formación Los Monos del Devónico en la parte inferior, como se muestra en la tabla 5 (Suarez-Soruco, 2000).

TABLA 5: PROGNOSIS GEOLÓGICA POZO HCY-2

EDAD	FORMACIÓN	PROFUNDIDAD DEL TOPE			ESPESOR
		m. MD	m TVD	m. SS	m
CARBONÍFERO	Taiguati	2430	2430	-1502	99
	Tarija	2529	2529	-1601	161
	Itacuami	2690	2690	-1762	110
	Tupambi	2800	2800	-1872	267
	FALLA	3067	3067	-2139	0
	Tunambi	3067	3067	-2139	258
DEVÓNICO	Iquiri	3325	3325	-2397	245
	Los Monos	3570	3570	-2642	628
	Hmp H1b	4290	4280	-3252	102
	Icla	4430	4416	-3488	281

Fuente: Elaboración propia modificado en base (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

Litológicamente la formación Iquiri presenta en la sección superior intercalaciones de areniscas, limolitas y niveles lutíticos. El intervalo intermedio consiste en areniscas, limolitas e intercalaciones delgadas de lutitas, la base consiste en areniscas intercaladas con lutitas y limolitas según el (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015).

En la tabla 6 se muestra información general de la formación Iquiri del pozo Huacaya-2 (HCY-2) Bloque Caipipendi.

TABLA 6: INFORMACIÓN GENERAL DE LA FORMACIÓN IQIRI

CARACTERÍSTICAS	SUBANDINO SUR
LÍMITES	Superior con la formación Tupambi e inferior con la Formación los Monos
ESPESOR	Entre 245 m
LITOLÓGÍA	Alternancia de Lutita Limolita y Areniscas

Fuente: Elaboración propia en base a (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

3.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA FORMACIÓN IQIRI

Los afloramientos de la formación Iquiri forman parte del último ciclo transgresivo-regresivo de la cuenca Siluro-Devónica. Los afloramientos de la formación Iquiri se describen como una serie continúa compuesta por espesos bancos de sedimentos finos, areniscas de grano fino de tonos gris claro y verdosos, limolitas y facies heterolíticas ricas en lutitas gris medio oscuro (Reynaldi, 2014).

Según (Iriondo, 2009), los sedimentos de la formación Iquiri tienen las siguientes características:

- Las areniscas fueron transportadas y depositadas por corrientes de agua, compuesta por fragmentos de minerales, asimismo formadas por clastos de arenas y cemento químico, generalmente sílice o calcita, en algunos casos contiene una matriz arcillosa.
- Los limos y arcillas fueron transportados en suspensión de forma independiente a la arena, donde los limos se sedimentaron en agua completamente estancadas y las arcillas se sedimentaron mediante procesos de floculación. La diferencia entre el limo y arcilla es que el limo se desmenuza en forma de polvo, y la arcilla, en cambio compuesta en su mayor parte por minerales como caolinita, montmorillonita o illita, es plástica cuando esta húmeda y se endurece al secarse. La compactación es típica de arcillas y limos, estos sedimentos finos en conjunto se denominan pelitas que poseen una elevada porosidad al sedimentarse.
- Las lutitas son rocas sedimentarias de grano fino, normalmente laminadas.

Las areniscas de la formación Iquiri fueron clasificadas como arenitas sub-feldespáticas y fragmentos líticos. Las determinaciones corresponden a secciones delgadas de muestras obtenidas en afloramientos.

Según (Reynaldi, 2014) la clasificación de las areniscas de la formación Iquiri tienen las siguientes características:

- Sub-feldespáticas: Predominantemente de feldespatos de ortosa y glagiosa subordinada que varía entre 6 y 10%.
- Fragmentos líticos: El cuarzo constituye entre el 70% y 90% del total de la fracción detrítica. Mientras que los líticos representados por rocas metamórficas tienen concentraciones variables de 3 a 4 %, las intercalaciones de bancos arenosos alcanzan espesores de hasta 2,5 m.

3.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS DE LA FORMACIÓN IQIRI

3.3.3.1. POROSIDAD

La formación Iquiri presenta un espesor variado debido a efectos erosivos, incluso al punto de desaparecer, se compone de lutitas grises micáceas, de color gris oscuro o gris claro intercaladas con areniscas grises de grano fino a muy fino en bancos delgados de 1 m a 4 m y rara vez mayores a 10 m. Su porosidad relativamente presenta valores que varía entre 3 % y 4,5%, sin superar el 8,5%, sin embargo, son reservorios de interés por encontrarse intercalados en lutitas que sirven de buen sello. (Benedetto, 2008)

3.3.3.2. PERMEABILIDAD

La presencia de lutitas inestables, areniscas fracturadas son causas de pérdidas de circulación, asimismo se observó pérdida de lodo por ser una formación de arenas permeables, donde frecuentemente se realiza una cementación adecuada para conseguir integridad en el zapato y aislar arenas permeables. La permeabilidad frecuentemente medidos en coronas muestra valores

aproximados a 0,025 mD, sin embargo, las alternancias de areniscas presentes en la formación Iquiri pueden alcanzar valores de hasta 40 mD. (Benedetto, 2008)

3.3.4. ANÁLISIS DE PRESIÓN EN LA FORMACIÓN IQIRI DEL POZO HUACAYA 2 (HCY 2)

Durante la perforación del pozo HCY 2 se observó pérdida de circulación en la formación Iquiri con un peso del lodo de 9,2 ppg a una profundidad de 3360 m, por lo que se realizará los cálculos para determinar la presión que ejerce la columna de fluido hacia la formación a esa profundidad, de modo que no supere la presión de fractura.

3.3.4.1. PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Ecuación de presión hidrostática

$$Ph = C * \rho_L * TVD \quad (31)$$

Fuente: (Energy API, 2001)

Donde:

$C =$ Factor de conversion ($gal/in^2 \times pie$)

$\rho_L =$ Densidad del fluido (lb/gal)

$TVD =$ Profundidad vertical verdadera (pie)

Reemplazando datos:

$$\rho_L = 9,2 \text{ lb/gal}$$

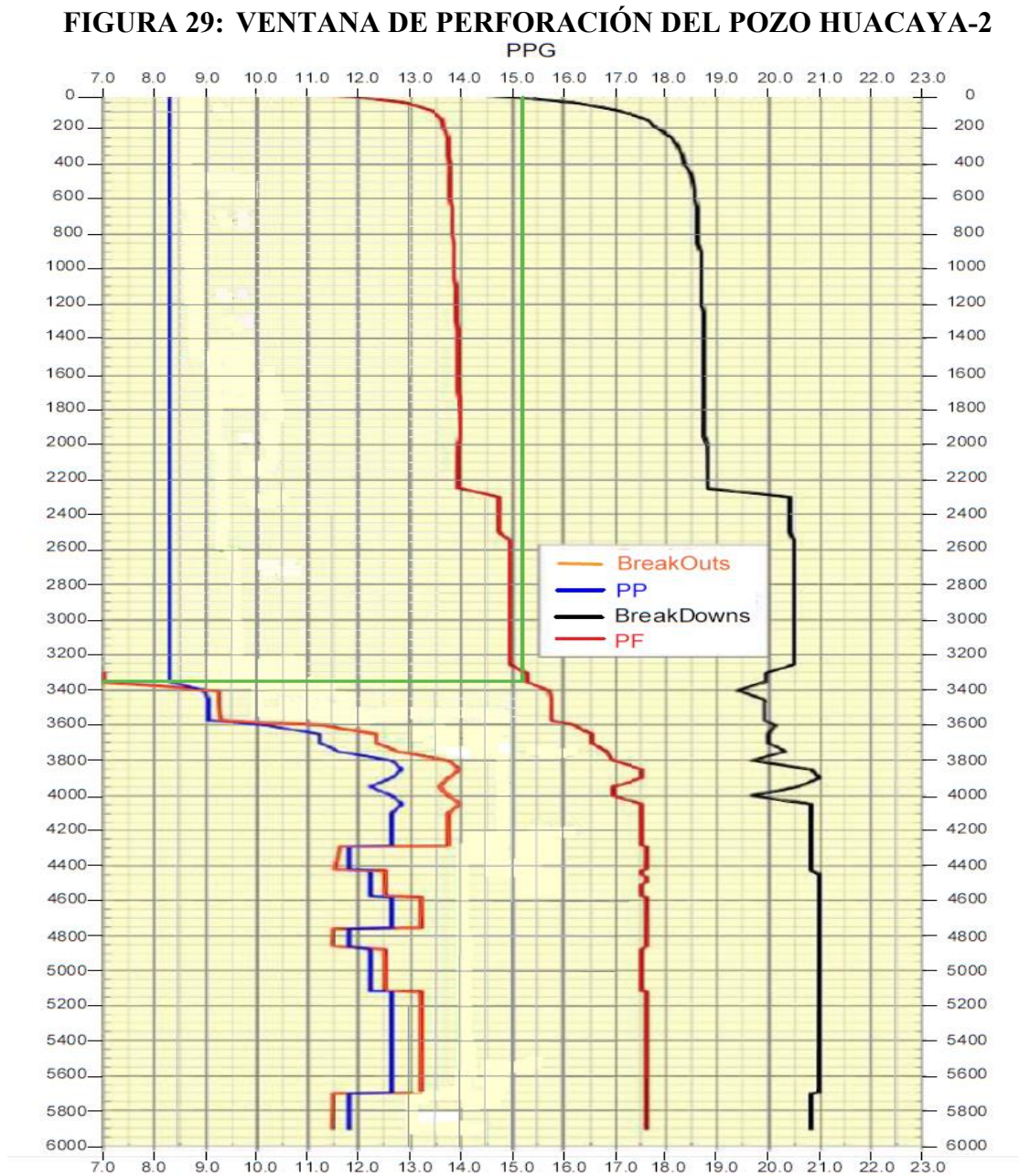
$$TVD = 3360 \text{ m} = 11020,8 \text{ pie}$$

$$Ph = 0,052 * 9,2 * 11020,8$$

$$Ph = 5272,351 \text{ psi}$$

3.3.4.2. PRESIÓN DE FRACTURA

Mediante la ventana de perforación del pozo HCY 2, se determinó el rango permisible de densidad del fluido de perforación, requerido para no comprometer la estabilidad del pozo, que puede ser visto en la figura 29.



Fuente: (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

La ventana de operación establece un rango determinado de densidades para la columna de fluido, como se muestra en la figura 29, donde:

- BreakOuts: Representa el derrumbe orientado y localizado a cierta profundidad del hoyo, causado por el resultado de un desequilibrio en los esfuerzos que ocurre en la dirección del mínimo esfuerzo horizontal.
- Presión de poro (PP): Se define como la presión que ejerce el fluido contenido dentro de los espacios porosos de una roca. (Hawker, 2001)
- BreakDowns: Presión requerida para iniciar fracturamiento hidráulico, consiste en inyectar un fluido (salmuera y surfactante) a la formación, con el fin de encontrar la presión de ruptura de la misma. (Camacho & C.A., 2019)
- Presión de fractura (PF): La presión máxima que puede soportar la formación, antes de exceder su resistencia a la tensión y la formación se fracture. (Hawker, 2001)

Ecuación de presión de fractura

$$P_f = C * \rho_L * TVD \quad (32)$$

Fuente: (Energy API, 2001)

Donde:

C = Factor de conversión ($gal/in^2 \times pie$)

ρ_L = Densidad del fluido dentro de los espacios poros (lb/gal)

TVD = Profundidad vertical verdadera (pie)

Reemplazando datos:

$$\rho_L = 15,24 \text{ lb/gal}$$

$$TVD = 3360 \text{ m} = 11020,8 \text{ pie}$$

$$Pf = 0,052 * 15,24 * 11020,8$$

$$Pf = 8733,764 \text{ psi}$$

Entonces:

$$Ph < P_{fractura}$$

$$5272,351 \text{ psi} < 8733,764 \text{ psi}$$

La presión Hidrostática máxima que puede alcanzar el fluido de perforación antes de fracturar la formación es de 8733,764 psi, mediante los resultados obtenidos se descarta la pérdida de circulación por una presión excesiva o inducida, dado que la presión hidrostática es menor a la presión de fractura, sin embargo, la formación Iquiri se halla constituida por lutitas poco consolidadas al cual se atribuye la pérdida de circulación.

3.3.5. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DE FILTRADO DE

FLUIDOS DE PERFORACIÓN UTILIZADOS EN LA FORMACIÓN IQIRI

3.3.5.1. FLUIDO DE PERFORACIÓN USADOS EN EL POZO HCY 2

El sistema Devónico está constituido por paquetes masivos de lutitas, limolitas y areniscas presurizadas, que causan problemas operacionales durante la perforación. A continuación, se presenta información del tipo de fluido en cada tramo del pozo HCY 2.

TABLA 7: LODOS DE PERFORACIÓN DEL POZO HUACAYA 2

FASE	PROFUNDIDAD	FORMACIÓN	TIPO DE FLUIDO	SISTEMA	MATERIALES BÁSICOS
36"	0-98 m	N/A	LODO WBM	DRILPLEX AR	DRIPLEX, GELPLEX, SOSA CAUSTICA, SODA ASH, CARBONATO DE CALCIO
24"	98-1500 m	ESCARPMENT, TAIGUATI	LODO WBM	DRILPLEX AR PLUS	DRIPLEX, GELPLEX, SOSA CAUSTICA, SODA ASH, FLOPLEX, CARBONATO DE CALCIO
17 1/2 "	1500- 3570 m	TARIJA, TUPAMBI, IQIRI	LODO WBM	DRILPLEX AR PLUS	KLA-STOP, POLIPAC UL, RESINEX-II, PA-10, CARBONATO DE CALCIO
12 1/4"	3570- 4290 m	LOS MONOS, HUAMAMPA, ICLA	LODO OBM	MEGADRIL	MEGAMUL, VERSAGEL, VERSATROL M, CLORURO DE CALCIO, CARBONATO DE CALCIO FINO/MEDIO/GRUESO, BARITINA, VERSAWET
8 1/2	4290-5700 m	HUAMAMPAMPA H1B, H1C, ICLA, LOS MONOS	LODO OBM MEGADRIL	MEGADRIL	MEGAMUL, VG-SUPREME, CAL, ECOTROL RD, CLORURO DE CALCIO, CARBONATO DE CALCIO MARMOLADO FINO
6"	5700- 5900 m	HUAMAMPAMPPA H2, ICLA	LODO OBM	MEGADRIL	MEGAMUL, VG-SUPREME, CAL, ECOTROL RD, SALMUERA DE CLORURO DE CALCIO, CARBONATO DE CALCIO MARMOLADO F/M/G

Fuente: (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015)

En la tabla 7, se observa que la formación Iquiri se encuentra en el tercer intervalo con un fluido base agua, sistema Drilplex AR Plus.

3.3.5.2. FLUIDO DE PERFORACIÓN USADO EN LA FORMACIÓN IQIRI

La formación Iquiri se encuentra entre una profundidad de 3325 m - 3570 m, con un espesor de 245 m, según el programa de fluidos de perforación del pozo HCY 2 se utilizó un fluido base agua Sistema Drilplex AR Plus.

El sistema de fluido Drilplex AR Plus, posee características reológicas y tixotrópicas que lo hacen ideal para la perforación de tramos o zonas propensas a pérdidas de circulación, estabilización de

formaciones no consolidadas, perforación en aguas profundas, asimismo proporciona un fluido con una buena suspensión de sólidos. (Swaco., 2014)

A continuación, se menciona los principales componentes del sistema Drilplex y las funciones que desempeñan según el (Programa de perforacion Pozo HCY-2. , 2015).

- **GELPLEX:** Es una bentonita sódica no tratada, especialmente seleccionada para su uso en el sistema Drilplex. Está diseñado para asegurar que el Drilplex de óxido metálico se adsorba sobre plaquetas de arcilla hidratadas para formar un complejo estable fuerte de alta viscosidad y gel.
- **SODA ASH:** Se emplea como un activador en el sistema Drilplex, proporciona el ambiente químico para que el Drilplex pueda formar el complejo.
- **SODA CAUSTICA:** Se emplea como hidroxilo iones para controlar el pH, es una base fuerte muy soluble en agua.
- **BARITA:** La barita o sulfato de bario, se lo emplea como densificante para ajustar la densidad del fluido.
- **FLOPLEX:** Reductor de filtrado, es un derivado de polisacárido, especialmente diseñado para el sistema Drilplex, sin incidir en el comportamiento reológico del sistema, como se observa con agentes de control de pérdida de líquidos aniónicos convencionales, tales como CMC y PAC.
- **SAFE CIDE:** Es un biocida no fenólico, no contiene azufre, diseñado para evitar degradación bacteriana en los fluidos de perforación a base de agua y de baja salinidad.

- TACKLE: Es un polímero aniónico líquido de bajo peso molecular, es empleado como defloculante. Se lo tiene programado como material de contingencia en el caso de requerirse realizar tratamiento de control de reología para el cambio de fluido.
- CARBONATO DE CALCIO: Material empleado como sellante en los tramos permeables, de acuerdo con la granulometría que se requiera y altamente soluble en soluciones ácidas.
- CONQOR 404: Es un inhibidor de corrosión compuesto por organofosforado, soluble en agua. Es un inhibidor que forma una película protectora sobre las superficies metálicas para protegerlas contra el ataque de la corrosión.

3.3.5.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y REOLÓGICAS DEL PROGRAMA DE FLUIDOS EN LA FORMACIÓN IQIRI

A continuación, se detallan las propiedades físicas y reológicas del fluido de perforación utilizado para perforar la formación Iquiri en el pozo HCY 2.

TABLA 8: PROPIEDADES DEL LODO EN LA FORMACIÓN IQIRI POZO HCY 2

PROPIEDADES GENERALES	
PROPIEDAD	VALORES
Densidad de lodo	9,2 – 10,0 lb/gal
YP	20 - 40 lb / 100 pie ²
VP	10 - 25 Cp
Filtrado API	<8,0 / 30 min
MBT	<20 lb / bbl
Drilling Solids	<5 %
pH	10,0-10,5

Fuente: (Programa de perforación Pozo HCY-2. , 2015)

Se formuló un fluido de perforación con una densidad inicial de 9,2 lb/gal el cual se incrementó progresivamente hasta una densidad máxima de 10 lb/gal, durante la perforación del pozo HCY 2.

A una profundidad de 3360 m, se presentó pérdida de circulación, perdiendo un volumen de 293 bbl, realizando trabajos de control de pérdida, se trató con agregados de material sellante medio y grueso logrando controlar la pérdida de fluido.

3.4. ANALIZAR LOS MATERIALES A BASE DE FIBRAS NATURALES Y ADITIVOS BIODEGRADABLES

Este proyecto presentara nuevas alternativas para los aditivos de los fluidos de perforación, los cuales son residuos de desechos industriales. El principal objetivo es poder utilizar productos de desecho de alimentos o de industrias varias como aditivos de fluidos de perforación para mejorar las propiedades reológicas del lodo, mejorar las propiedades del filtrado y evitar los problemas ambientales que suelen causar los aditivos químicos convencionales. Tales desperdicios o desechos están disponibles y son de fácil acceso por resultar de no interés industrial, lo que los convierte en un buen candidato para una correcta investigación. El uso de estos productos de desecho afecta al costo total de las operaciones de perforación reduciéndolo, brindando una mejor solución económica. Los productos de desecho representan alrededor del 8,2 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y se pueden utilizar para mejores usos, como aditivos para fluidos de perforación. En general, son seguros de manipular los desechos en comparación con los aditivos químicos, ya que algunos aditivos químicos tienen peligros que requieren un equipo adecuado para poder manipularlos.

3.4.1. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES FIBROSOS Y EL TIPO DE ADITIVO BIODEGRADABLE

A nivel mundial creció el interés por el concepto biodegradable, es por tanto que se han realizado una variedad de experimentos que se han realizado con productos de desecho para poder evaluar

las propiedades del lodo de perforación en base de agua para compararlas con aditivos de fluidos de perforación no biodegradables convencionales. Es así que como ejemplos de los experimentos realizados en laboratorio con desechos alimenticios como ser la cáscara de plátano, cáscaras de patata y goma arábica como fuentes de productos de desecho de alimentos, tuvieron un método de aplicación al lodo en forma de polvo y cenizas. Los resultados de estos experimentos resultaron favorables ya que los aditivos mejoraron las propiedades del lodo, como el peso del lodo, las propiedades reológicas y las propiedades de filtración.

Se han realizado experimentos utilizando una variedad de productos de desecho de alimentos. Donde se han usado pulpa de oliva, mazorca de maíz, almidón de maíz, polvo de granada, pulpa de melocotón, goma de tamarindo, soja, fibra de coco, caña de azúcar, hierba y henna en polvo. Los resultados experimentales también fueron favorables ya que la mayoría de los productos de desecho de alimentos mejoraron las propiedades reológicas y las propiedades de filtración. (Rahman M. K., 2018)

Así como diversos autores han realizado experimentos con dichos materiales de desecho alimenticios también se cuenta con el aporte de otros autores que realizaron no solo experimentos con otros tipos de materiales de desechos alimenticios, sino que los combinaron tratando de optimizar a estos materiales para obtener un mayor beneficio.

Es así que este proyecto si inspira en los experimentos que estos autores realizaron, buscando el poder comprobar que estos desechos sean favorables en la combinación con el lodo de perforación base agua simulando una aplicación en la formación Iquiri en el pozo huacaya 2.

Los materiales de desechos a investigarse son: fibra de caña de azúcar, fibra de corteza de cedro y polvo de hierba.

3.4.2. RECOLECTAR Y ANALIZAR LOS MATERIALES A BASE DE FIBRAS Y EL ADITIVO BIODEGRADABLE

3.4.2.1. RECOLECCIÓN

➤ FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

Cada año las cantidades de desecho de caña de azúcar llegan a ser de los miles de millones de toneladas debido a la gran utilidad de este tanto para la producción de azúcar como de alcohol. Es así que para el presente proyecto se recolecto la caña de azúcar de los comerciantes de venta de jugo de caña de azúcar, ver figura 30.

Las cañas de azúcar a niveles industriales tienen dos finalidades comerciales la producción de azúcar refinada y la obtención de alcoholes (hidratado 96% y anhidrido 99.5). El bagazo o desecho de la caña de azúcar una vez proceda tiene fin a fábricas de papel o como combustible. El bagazo al salir de la molienda se conduce a bagacera para que seque y luego se va a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos. (PLURAL, 2021)

FIGURA 30: VENDEDOR AMBULANTE DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR



Fuente: (Young, 2010)

➤ FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

La producción de madera de cedro en Bolivia ocupa el cuarto puesto, siendo una madera medianamente utilizada, es así que para la obtención de la corteza de cedro se realizó la búsqueda en la localidad más cercana donde se tenga la explotación maderera de este material, es así que la localidad de donde se pudo obtener la corteza de cedro es en localidad de Guanay en la provincia Larecaja del departamento de La Paz, ver figura 31.

FIGURA 31: CORTEZA DE CEDRO



Fuente: Elaboración propia (2024)

➤ POLVO DE HIERBA

La hierba es un material que está presente en todas partes siendo usado tanto como alimento para el ganado vacuno y otros fines. La recolección de este material se lo realizó en predios de Cota Cota de nuestra universidad en los alrededores del bloque de la carrera de ingeniería petrolera, ver figura 33.

FIGURA 32: ZONA DE RECOLECCIÓN DE LA HIERBA



Fuente: Elaboración propia (2024) y (AM.DRONE4K, 2020)

3.4.2.2. ANÁLISIS Y PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES PARA USO EN PRUEBAS EN LABORATORIO

➤ FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

Para poder obtener la fibra de la caña de azúcar y poder usarlo en el laboratorio, se debió separar la fibra interna de la caña de la capa externa más dura ver figura 33.

FIGURA 33: CAÑA DE AZÚCAR RECIÉN PROCESADA



Fuente: Elaboración propia (2024)

La composición de la caña de azúcar contiene agua, materia orgánica y minerales, debido a su alto contenido de agua se debe secar la fibra y eliminar el contenido de agua, se dejó secar al sol durante una semana ver figura 34.

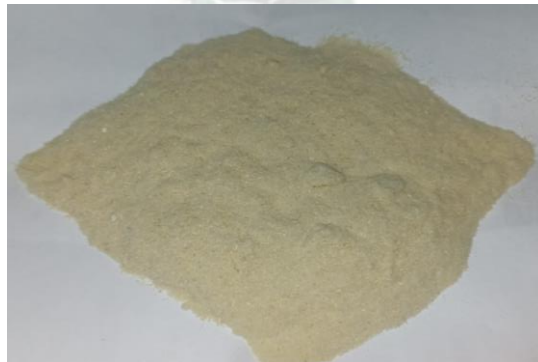
FIGURA 34: SECADO DE LA CAÑA DE AZÚCAR



Fuentes: Elaboración propia (2024)

Una vez seca la fibra se lo sometió a molienda en una procesadora de alimentos para obtener la fibra. (ver figura 35).

FIGURA 35: FIBRA CAÑA DE AZÚCAR



Fuentes: Elaboración propia (2024)

La molienda del material nos dio como resultados tamaños de fibra que varían entre las 300 μm y 74 μm . Siendo este último el tamaño con el cual se trabajará, cabe mencionar que teóricamente

una fórmula ideal sería contar con una concentración en mezcla de diferentes tamaños de partícula los cuales oscilen entre las 30 μm y 74 μm , para el caso del presente proyecto no se pudo contar con moliendas en laboratorio que brinden la obtención de partículas inferiores a las 74 μm .

➤ **FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO**

La recolección de la corteza de cedro para realizar su análisis en laboratorio, se obtuvo en los alrededores del pueblo de guanay en la zona de los yungas de La Paz, se tardó 3 días en cortar y traer el trozo madera hasta la ciudad de La Paz siendo el traslado hasta la zona de ida y vuelta el mayor tiempo transcurrido.

La corteza del tronco del árbol de cedro desechado se puede recolectar, dejar secar al sol al aire libre para eliminar la humedad al menos durante una semana. Cortar la corteza seca convirtiéndola en trozos pequeños. Los trozos picados se limpian y se someten a trituración seguido de una molienda. (Ver figura 36).

FIGURA 36: FIBRA CORTEZA DE CEDRO



Fuente: Elaboración Propia (2024)

De la misma manera la molienda del material nos dio como resultados tamaños de fibra que varían entre las 300 μm y 74 μm , para el caso del presente proyecto no se pudo contar con moliendas en

laboratorio que brinden la obtención de partículas inferiores a las 74 μm , por tal razón el experimento se realizó con el tamaño mínimo de partícula obtenida en la primera molienda.

➤ **POLVO DE HIERBA**

La hierba es una planta urbana y de campo, puede crecer en cualquier parte, la abundancia de este material orgánico facilita la recolección, tanto en campos de producción de fardos de hierba para el ganado o en zonas públicas en ciudades. Para el presente proyecto, se pudo recolectar la hierba en predios de la U.M.S.A. en cota cota. Una vez se recolecto la hierba, se la remojo con el objetivo de lavarla para separarla de posibles impurezas que pueda contener, seguido, dejarlo secar al sol por 1 semana mínimo, posterior se lo debe poner al horno a 90 °C en un tiempo de 30 min esto con el fin de deshidratarla por completo, como ultimo lo llevamos a molienda en una procesadora de alimento hasta conseguir el polvo de hierba. (Ver figura 37)

FIGURA 37: POLVO DE HIERBA



Fuente: Elaboración propia (2024)

De la misma manera la molienda del material nos dio como resultados tamaños que varían entre las 300 μm y 74 μm . Cabe mencionar que teóricamente lo ideal sería contar con un tamaño de partícula inferior a las 10 μm y así con un material en polvo fino, pero para el caso del presente

proyecto no se pudo contar con molindas en laboratorio que brinden la obtención de partículas inferiores, por tal razón se experimentó con un tamaño de partícula de 74 μm .

3.4.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS FIBRAS NATURALES Y DEL ADITIVO BIODEGRADABLE

La principal característica que tienen es que los 3 materiales poseen en su composición **Lignina**, la cual varía en porcentajes en cada material, estos datos se especificarán más en los siguientes puntos. La lignina es un componente natural que existe en los compuestos orgánicos, lo que se conoce sobre ella en la industria petrolera es que su aplicación se da por tratamientos químicos como obturante, previamente extraído de materiales orgánicos. Se presume que estos tratamientos se deben a que la lignina en un aspecto natural es insoluble en agua, puede generar geles viscosos y afectar a la fluidez del fluido. En los experimentos se espera encontrar diferencias que favorezcan o no a los fluidos, esto en comparación a los diferentes porcentajes de lignina que contienen. Por otro lado, su característica significativa se verá reflejada en el costo del fluido con cada uno de estos materiales, esto por el hecho de que los mismos son considerados desechos es decir que tendrían un costo relativamente nulo.

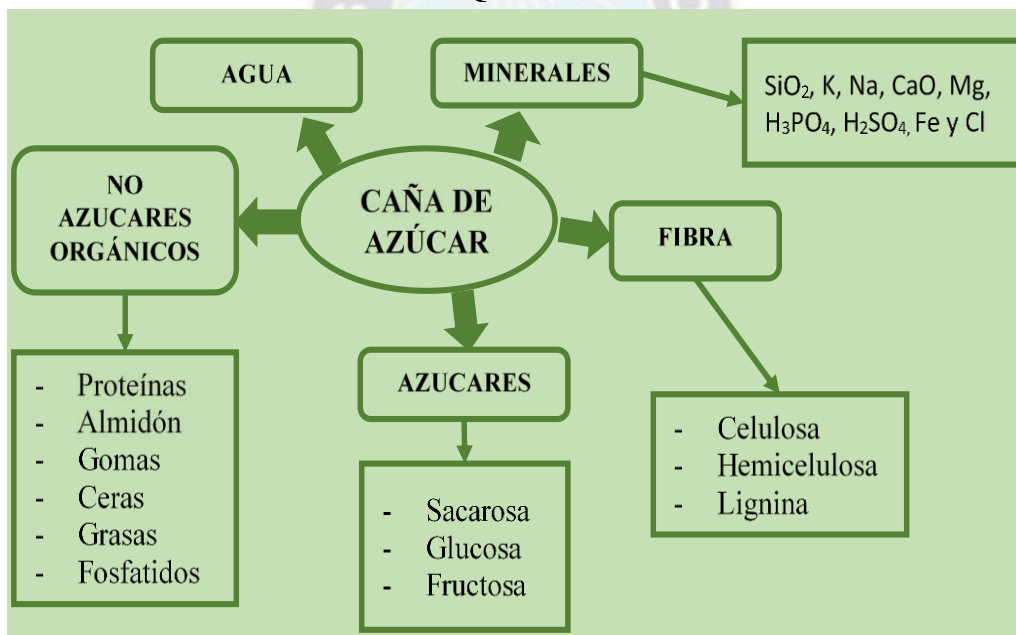
➤ FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar es una gramínea tropical. Es un pasto gigante que tiene un tallo macizo de 2 a 5 metros de altura y entre 5 a 6 centímetros de diámetro. El tallo contiene un jugo rico en azúcar (sacarosa), que para su consumo se extrae y cristaliza mediante un proceso químico. Las tierras en donde se cultiva tienen que ser lugares calientes y soleados para que el fenómeno de la fotosíntesis se oriente hacia la producción de carbohidratos, como la celulosa y otras materias que constituyen el follaje y el soporte fibroso del tallo. Durante su desarrollo, la siembra requiere de una adecuada

cantidad de agua para que se permita la absorción, transporte y asimilación de los nutrientes. El periodo de crecimiento varía entre los 11 y 17 meses, dependiendo de la variedad de caña y de la zona. Su nombre científico es **saccharum officinarum**.

Su composición se forma de Agua entre 65% - 75%, azúcares entre 11% - 18%, fibra entre 8% - 14%, solidos solubles entre 12% - 23%, a continuación, en la figura 38 se detalla más sobre su composición. Cabe recalcar que dentro su composición más específicamente dentro de la fibra esta se conforma en porcentaje de Lignina en un 4% a 6% dependiendo el tipo de cana que se halla cosechado.

FIGURA 38: COMPOSICIÓN QUIMICA DE LA CAÑA DE AZÚCAR



Fuente: Elaboración propia basa en (Informacion nutricional de la panela , 2018)

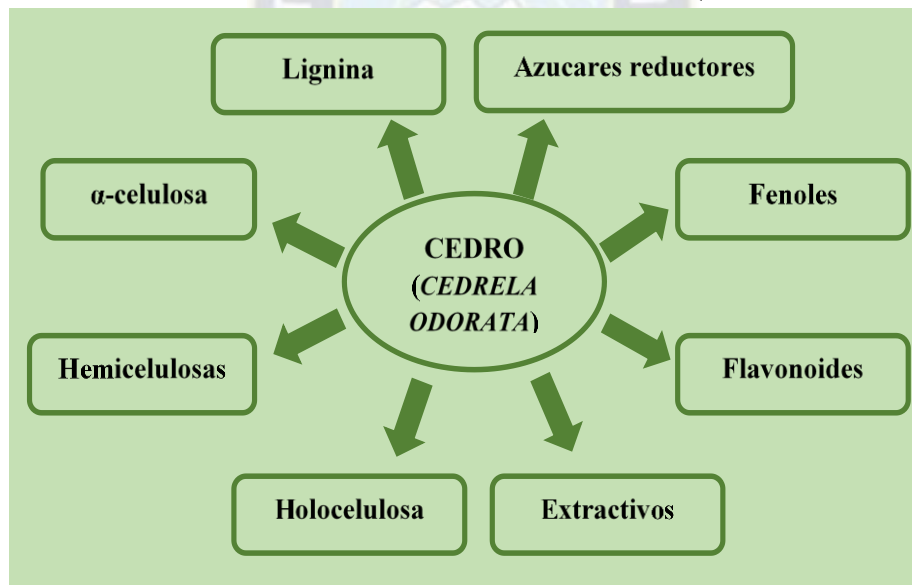
➤ FIBRA DE CEDRO

La característica visual más imponente, es su altura que alcanza los 35 m de altura y 120 cm de diámetro tiene un fuste más o menos cilíndrico estrechándose al extremo recto, con copa esférica densa. La corteza del cedro encontrado es de color castaño claro, claramente fisurado. la corteza

es astringente y se emplea en medicina como un tónico, es una madera muy utilizada en carpintería de construcción, marcos de puertas y ventanas; en mueblería es utilizada, pero en menor escala.

Según (Lima, 2013), la madera está constituida por componentes primarios y secundarios, estos compuestos químicos están distribuidos en la madera por toda la pared celular en cantidades variables. Estos mismos componentes son detallados en la figura 39. Cabe recalcar que el cedro de los 3 materiales investigados es el que tiene el porcentaje más alto en contenido de Lignina en un 26% - 31%. Por otra parte, recalcar una característica individual diferente de los otros materiales investigados, es la cantidad alta en porcentaje de Taninos que contiene, alrededor de un 42%, características que combinadas podrían generar cambio en la reología del fluido.

FIGURA 39: COMPOSICIÓN QUIMICA DEL CEDRO (CEDRELA ODORATA)



Fuente: Elaboración propia basada en (Martha Rosales, 2016)

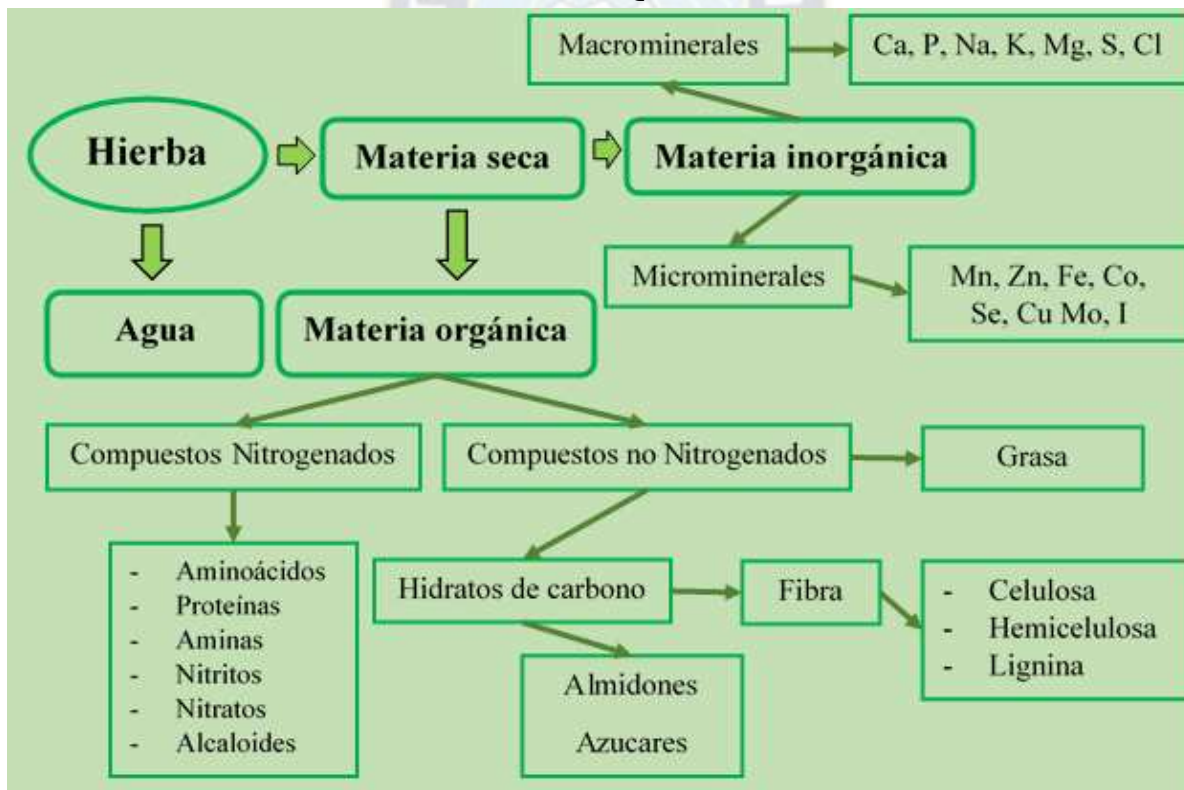
➤ **POLVO DE HIERBA**

La hierba o pasto son recursos vegetales que sirven de alimento al ganado. Las hierbas herbáceas pueden surgir de manera espontánea o bien se pueden sembrar. La mayoría de las especies de

hierba o pasto no presentan mucha altura y las raíces no suelen ser muy profundas generando un tapiz herbáceo diverso y denso. Esta especie presenta una gran adaptación al pastoreo o a la siega. Perteneciendo fundamentalmente a dos grandes familias las cuales son: las gramíneas y las leguminosas. Para el caso de estudio en este proyecto se realizó los estudios en laboratorio de la hierba perteneciente a la familia de las gramíneas debido a la capacidad que tiene en su crecimiento el cual es adaptable a cualquier clima o lugar. (CREAF, 2020).

Las características de su composición química son detalladas en la figura 40. Cabe recalcar que al igual que los otros 2 materiales la hierba también cuenta con un porcentaje de lignina entre un 8% y 10%. Además de contar con porcentajes más altos de potasio (K), Calcio (Ca) y sodio (Na).

FIGURA 40: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PASTOS



Fuente: Elaboración propia basa en (ORIGEN Y GENERALIDADES DE LOS FORRAJES , 2021)

3.5. FORMULAR EL FLUIDO DE PERFORACIÓN CON MATERIALES A BASE DE FIBRAS NATURALES Y ADITIVOS BIODEGRADABLES

3.5.1. MALLA EXPERIMENTAL

Para el siguiente proyecto se utilizó un fluido base agua, con MIL PAC - R debido a la presencia de fracturas naturales en la formación Iquiri, que es compatible con lutitas. A este fluido se le agregó materiales de desechos a base de fibras y biodegradables, en partículas con granulometrías medidas entre las 200 μm y 74 μm en concentraciones 5 (lb/bbl), para evaluar su efecto en las propiedades reológicas y de filtrado del fluido.

Para poder evaluar correctamente todos los materiales se realizó varios ensayos con diferentes granulometrías de las cuales los mejores resultados serán presentados en este proyecto.

Primeramente, se realizó el balance de materiales para formular un sistema de fluido base el cual mínimamente cumpla con los requisitos que la formación Iquiri necesita, como ser, una densidad 9,2 lpg del fluido de perforación.

A continuación, se detalla las concentraciones y función de los aditivos utilizados en el fluido base, en función a rango de concentraciones establecido por (Energy API, 2001).

TABLA 9: ADITIVOS UTILIZADOS EN EL FLUIDO BASE

ADITIVO	FUNCIÓN	CONCENTRACIÓN (lb/bbl)
Bentonita	Viscosificante	10
Barita	Densificante	Según requerimiento
Potasa caustica	Aumento de pH	1
MIL PAC - R	Control de filtrado	0.5

Fuente: Energy API, (2001)

Se realizó el balance de materiales para determinar la cantidad de cada aditivo y agua para formular 350 ml de fluidos que son equivalentes a 1 barril de fluido.

3.5.1.1. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y DE FILTRADO DEL FLUIDO BASE

Es esencial determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el nuevo fluido elaborado cumple con las características de la formación para mitigar la pérdida de circulación, por lo cual se realizó el balance de materia.

3.5.1.1.1. BALANCE DE MATERIA FLUIDO BASE

Datos:

$$V_t = 350 \text{ ml}$$

Bentonita $\rho_{\text{Ben}} = 2.3 \text{ g/ml}$

Barita $\rho_{\text{Bar}} = 4.2 \text{ g/ml}$

Hidróxido de potasio $\rho_{\text{KOH}} = 2.04 \text{ g/ml}$

Mil Pac - R $\rho_{\text{PAC}} = 1.6 \text{ g/ml}$

Lodo $\rho_t = 9.2 \text{ lpg}$

$$\rho_t = 9.2 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.103 \text{ g/ml}$$

Para la elaboración de lodo base se tomará un volumen experimental total de 350 ml

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_t * \rho_t = V_{\text{Ben}} * \rho_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} * \rho_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} * \rho_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} * \rho_{\text{PAC}} + V_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

Calculo para la bentonita

La concentración de la bentonita es de 10 lb/bbl, en unidades de g/ml es:

$$C_{\text{Ben}} = 10 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{Ben}} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de la bentonita.

$$m_{\text{Ben}} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$
$$m_{\text{Ben}} = 9.975 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{Ben}} = \frac{m_{\text{Ben}}}{V_{\text{Ben}}} \rightarrow V_{\text{Ben}} = \frac{m_{\text{Ben}}}{\rho_{\text{Ben}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{Ben}} = \frac{9,975 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{Ben}} = 4.337 \text{ ml}$$

Cálculo para Potasa caustica

La concentración de la Potasa caustica es de 1 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{KOH}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de Potasa caustica.

$$m_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350\text{ml}$$

$$m_{\text{KOH}} = 0.998 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{V_{\text{KOH}}} \rightarrow V_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{\rho_{\text{KOH}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{KOH}} = \frac{0,998 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{KOH}} = 0.471 \text{ ml}$$

Calculo para Mil Pac - R

La concentración del Mil Pac - R es de 0.5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{PAC}} = 0.5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa del Mil Pac - R.

$$m_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{PAC}} = 0.50 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{V_{\text{PAC}}} \rightarrow V_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{\rho_{\text{PAC}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{PAC}} = \frac{0.50 \text{ g}}{1.6 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{PAC}} = 0.3125 \text{ ml}$$

Realizando el balance de masa

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Reemplazando datos:

$$350 = 4,337 + V_{\text{Bar}} + 0,489 + 0.3125 + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Se despejo el volumen de baritina, obteniéndose:

$$V_{\text{Bar}} = 344.8615 - V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Sustituyendo en la fórmula despejada

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + V_{Bar} * \rho_{Bar} + V_{KOH} * \rho_{KOH} + V_{PAC} * \rho_{PAC} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + (344.8615 - V_{H_2O}) * \rho_{Bar} + V_{KOH} * \rho_{KOH} + V_{PAC} * \rho_{PAC} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de agua

$$350 * 1,103 = 4,337 * 2,3 + (344.8615 - V_{H_2O}) * 4,2 + 0,471 * 2,12 + 0.3125 * 1.6 + V_{H_2O} * 1$$

$$386,050 = 9,975 + 1448.4183 - 4,2 V_{H_2O} + 0.998 + 0.5 + V_{H_2O}$$

$$4,2 V_{H_2O} - V_{H_2O} = 9,975 + 1448.4183 + 0,998 + 0.5 - 386,050$$

$$3,2 V_{H_2O} = 1050.8953$$

$$V_{H_2O} = 328.40 \text{ ml}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de la barita:

$$V_{Bar} = 344.8615 - V_{H_2O}$$

$$V_{Bar} = 344.8615 - 328.40$$

$$V_{Bar} = 16.46 \text{ ml}$$

Obtención de masa de barita

$$\rho_{Bar} = \frac{m_{Bar}}{V_{Bar}} \rightarrow m_{Bar} = V_{Bar} * \rho_{Bar}$$

$$m_{Bar} = 16.46 * 4,2$$

$$m_{\text{Bar}} = 69.132 \text{ g}$$

Finalmente:

$$m_t = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{KOH}} + m_{\text{KCl}} + m_{\text{GX}} + m_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$m_t = 9.975 + 69.132 + 0.998 + 0.5 + 328.40$$

$$m_t = 409.005 \text{ g}$$

A continuación, se muestra los resultados obtenidos por el balance de materiales.

TABLA 10: RESULTADO DEL LODO BASE

FLUIDO BASE			
SUSTANCIA	DENSIDAD (g/ml)	VOLUMEN (ml)	MASA (g)
Barita	4.2	16.46	69.132
Bentonita	2.3	4.337	9.975
KOH	2.04	0.489	0.998
Mil Pac - R	1.6	0.3125	0.5
AGUA	1	328.4	328.4
TOTAL	1.103	350	409.005

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1.2. DENSIDAD

Para determinar la densidad del fluido base se utilizó una balanza de lodo, asimismo las pruebas se realizaron en triplicado para tener una mayor exactitud en la toma de datos, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 11: DENSIDAD DEL FLUIDO BASE

FLUIDO BASE			
Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio (lb/gal)
9,200	9,200	9,200	9,200

Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas del fluido de perforación base fueron realizadas utilizando el viscosímetro Fann modelo 35 SA, cada prueba se realizó a seis diferentes velocidades de rotación (600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM), con el cual se realizó el cálculo de la velocidad de corte y esfuerzo de corte, los resultados son ilustrados a continuación en la tabla 12.

TABLA 12: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO BASE

Ø	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
	Ø	Ø	Ø	Ø
600	47	47	47	47
300	34	33	34	33.67
200	27	26	26	26.33
100	20	21	20	20.33
6	10	10	10	10
3	11	11	11	11

Fuente: Elaboración propia

Mediante la lectura del viscosímetro se determinó los parámetros de viscosidad, según datos obtenidos puede indicarse que el fluido base se encuentra dentro del intervalo de propiedades utilizados en la formación Iquiri, como se muestra a continuación en la tabla 13, cabe mencionar que las tablas y gráficas siguientes fueron obtenidas del uso del software “Mudware”.

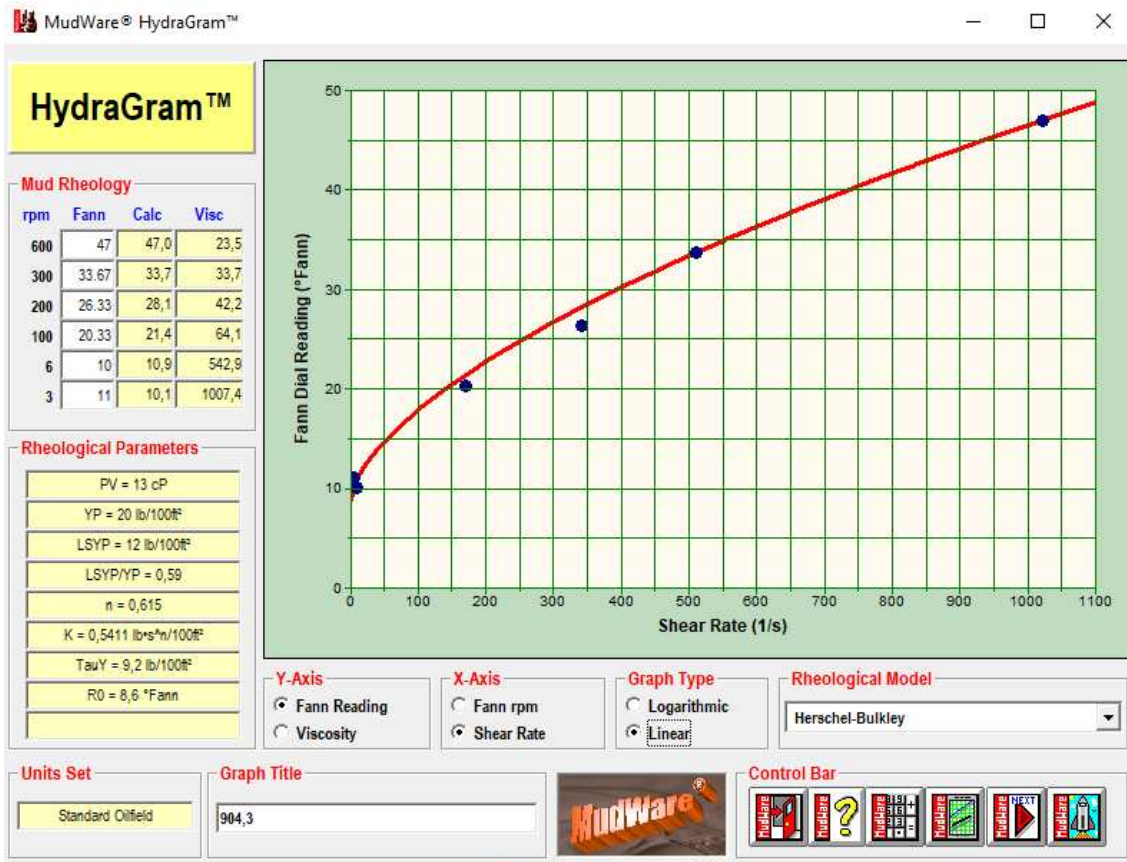
TABLA 13: PARÁMETROS DE VISCOSIDAD DEL FLUIDO BASE

PROPIEDADES	PROMEDIO
Viscosidad Plástica (cP)	13
Yield Point (lb/100 ft ²)	20

Fuente: Elaboración propia hecho con (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

Para determinar el modelo reológico que sigue el fluido base, se realizó la gráfica de este mismo como se presenta en la figura 41.

FIGURA 41: COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL FLUIDO BASE



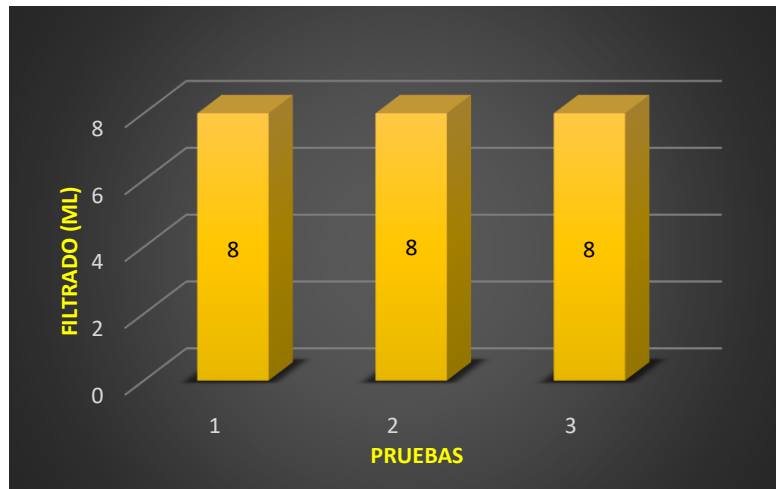
Fuente: Elaboración propia hecha con el (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

La curva de flujo de la figura 41, esta adapta al modelo de Herschell – Buckley o también denominada ley exponencial modificada, este modelo requiere un esfuerzo mínimo para iniciar el flujo.

3.5.1.1.4. FILTRACIÓN

Mediante las pruebas de filtrado API se puede conocer la capacidad de filtrado y la capacidad del fluido de generar un buen revoque. Los datos se tomaron a diferentes tiempos y el filtrado se registró en mililitros como se muestra a continuación.

FIGURA 42: RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN DEL FLUIDO BASE



Fuente: Elaboración propia

En la figura 42 se ilustra los resultados obtenidos en la prueba de filtrado del fluido base teniendo un filtrado promedio de 8.00 ml.

3.5.1.1.5. MUDCAKE

Los fluidos de perforación, su filtrado y el revoque de lodo son diseños importantes que se consideran para controlar el daño a la formación. La torta de lodo se define como la deposición sólida de las partículas filtradas durante la invasión del lodo de perforación en las rocas porosas. El líquido filtrado y la torta de lodo depositada se caracterizan según el tamaño de las partículas sólidas del lodo, los aditivos del lodo y sus concentraciones. La formación de revoque de lodo ayuda a disminuir la invasión de lodo y aumenta la estabilidad del pozo.

Calculando la densidad de solidos:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{m_{\text{solidos}}}{V_{\text{solidos}}}$$

Cálculo de la masa de solidos:

$$m_{\text{solidos}} = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{Pac}}$$

$$m_{\text{solidos}} = 9.975 + 69.132 + 0.5$$

$$m_{\text{solidos}} = 79.61 \text{ g}$$

Cálculo del volumen de solidos:

$$V_{\text{solidos}} = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{PAC}}$$

$$V_{\text{solidos}} = 4,337 + 16.46 + 0.3125$$

$$V_{\text{solidos}} = 21.11 \text{ ml}$$

Por tanto, la densidad:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{79.61}{21.11} \quad \rho_{\text{solidos}} = 3.77 \text{ g/ml}$$

Reemplazando en la ecuación 13:

$$\text{Masa húmeda: } m_{\text{húmeda}} = 8.67 \text{ g}$$

$$\text{Masa seca: } m_{\text{seca}} = 3.30 \text{ g}$$

$$\text{Densidad del fluido: } \rho_{\text{fluido}} = 9.2 \text{ g/ml}$$

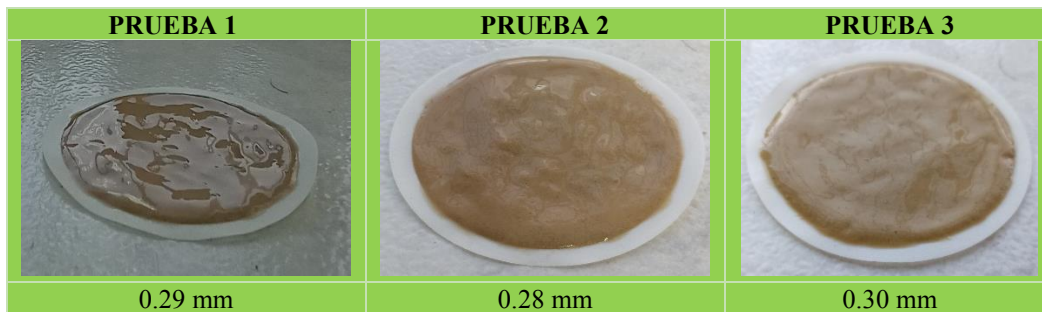
$$\text{Densidad de materiales secos: } \rho_{\text{solidos}} = 3.77 \text{ g/ml}$$

$$\epsilon = \frac{\frac{8.67}{3.71} - 1}{\frac{8.67}{3.71} - 1 + \frac{9.2}{3.77}} \quad ; \quad \epsilon = 0.354$$

El valor ε no debe pasar la unidad, y mientras sea más cerca de 0 significa que el fluido es demasiado viscoso, el valor del fluido base es de 0.354 habiendo tenido un filtrado exacto de 8 ml.

A continuación, se muestra el revoque formado, donde el espesor medido varía entre 0.28 a 0.3 mm.

FIGURA 43: REVOQUE DEL FLUIDO BASE



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.1.6. DISEÑO HIDRÁULICO DE FLUIDOS

La hidráulica y la reología, ambas estudian el comportamiento del o los fluidos que están relacionadas entre sí, para el caso del presente estudio de investigación, una vez que se determina las propiedades reológicas de los 3 fluidos propuestos, se procederá a realizar los cálculos de la parte hidráulica, de los 3 fluidos propuestos y así determinar el efecto que los fluidos generarán sobre las presiones del sistema.

Para el diseño hidráulico los cálculos se realizaron a una profundidad de 3360 m, esto debido a que a esa profundidad se originó la pérdida de circulación. A continuación, en la tabla 14, se muestra la descripción de las herramientas que se utilizaron para la perforación del tramo vertical del pozo HCY 2, donde se indica la longitud, el diámetro interno y externo de cada herramienta, estos son los datos que posteriormente se utilizarán para realizar todos los cálculos para el diseño hidráulico del fluido con los 3 tipos de fluidos (caña de azúcar, cedro y hierba).

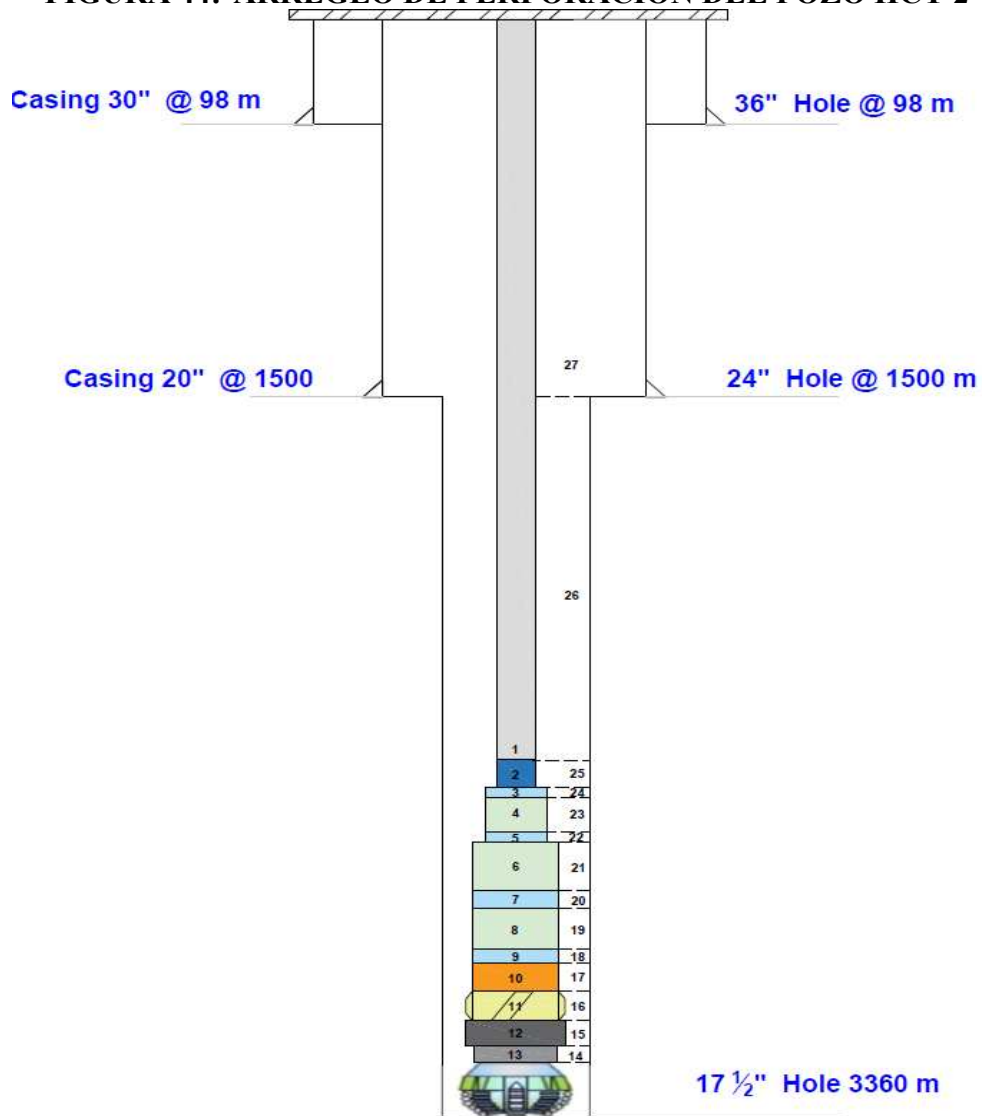
TABLA 14: DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA BHA DEL POZO HCY 2

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	OD (in)	ID (in)	Peso	Descripción
1	Drill Pipe	3127,85	10259,348	6,625	5,901	31.54	Drill pipe 6,625 in, DS65
2	Heavy Weight	57,14	187,4192	6,625	4.499	73.5	HWDP 6 5/8 DS65
3	Sub	1,11	3,6408	8	3	147	XO
4	Drill Collar	28,5	93,48	8	3	147	Drill Collar 8,000 in
5	Sub	1,07	3,5096	8	3	147	XO
6	Drill Collar	28,05	92,004	9,5	3	227	Drill Collar 9,500 in
7	Jar	9,59	31,4552	9,5	3	227	jar 9,500 in
8	Drill Collar	81,6	267,648	9,5	3	227	Drill Collar 9,500 in
9	Sub	3,19	10,4632	9,5	3	227	Shock Sub 9,500 in
10	MWD	8,75	28,7	9,5	5,9	177	Power Pulse 9,500 in
11	Stabilizer	2,1	6,888	9,5	3	227	String Stabilizer 9,500 in
12	Vertical Drilling	10,42	34,1776	9,62	7.03	218	Vortex 96ERT 6:7 17 3/8 Sleeve
13	Vertical Drilling	0,63	2,0664	9	6.75	158	Exceed 900 17 3/4
14	Bit	0,76	2,4928	17,5		477	Bicone/PDC bit 17 1/2 in

Fuente: Programa de Perforacion Pozo HCY-2, (2015)

Teniendo como dato la longitud de las herramientas, el diámetro del casing y el diámetro del hoyo abierto, se realizó el diseño del arreglo de perforación del pozo HCY 2 a una profundidad de 3360 m, como se muestra a continuación.

FIGURA 44: ARREGLO DE PERFORACIÓN DEL POZO HCY 2



Fuente: Elaborado en base al Programa de Perforacion Pozo HCY-2, (2015)

Inicialmente de forma general se realizó el cálculo de capacidad y volumen del fluido dentro del espacio interior y anular, sin considerar la barrena, debido a que presenta un valor despreciable.

- Espacio Interior

Se realizó el cálculo inicialmente para el drill pipe

TABLA 15: DATOS DEL ESPACIO INTERIOR DEL DRILL PIPE

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	ID (in)
1	Drill pipe	3127,85	10259,348	5,901

Fuente: Programa de Perforacion Pozo HCY-2, (2015)

Reemplazando datos:

$$Cap_{Dp} = \frac{(ID_{Dp})^2}{1029,4}$$

$$Cap_{Dp} = \frac{5,901^2}{1029,4}$$

$$Cap_{Dp} = 0,034 \text{ bbl/ft}$$

$$Vol_{Dp} = Cap_{Dp} \times h_{Dp}$$

$$Vol_{Dp} = 0,034 \times 10259,348$$

$$Vol_{Dp} = 348,818 \text{ bbl}$$

Se realizo el mismo procedimiento para determinar la capacidad y volumen del fluido de perforación en el espacio interior de las trece secciones, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 16: CAPACIDAD Y VOLUMEN DEL BHA EN EL ESPACIO INTERIOR

Nº	Tipo	Longitud		ID (in)	Capacidad (bbl)	Volumen (bbl)
		(m)	(pie)			
1	Drill pipe	3127,85	10259,348	5,901	0,034	348,818
2	Heavy weight	57,14	187,419	4,499	0,020	3,748
3	Sub	1,11	3,641	3,000	0,009	0,033
4	Drill collar	28,5	93,480	3,000	0,009	0,841
5	Sub	1,07	3,510	3,000	0,009	0,032
6	Drill collar	28,05	92,004	3,000	0,009	0,828
7	Jar	9,59	31,455	3,000	0,009	0,283
8	Drill collar	81,6	267,648	3,000	0,009	2,409
9	Sub	3,19	10,463	3,000	0,009	0,094
10	MWD	8,75	28,700	5,900	0,034	0,976
11	Stabilizer	2,1	6,888	3,000	0,009	0,062
12	Vertical drilling	10,42	34,178	7,030	0,048	1,641
13	Vertical drilling	0,63	2,066	6,750	0,044	0,091
	TOTAL	3360	11020,800		0,252	359,856

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se tiene un volumen total de 359,856 bbl en el espacio interior.

- Espacio anular

Para realizar los cálculos de capacidad y volumen en el espacio anular, se tomó en cuenta el diámetro interno del casing y el diámetro externo de las herramientas.

Se realizó el cálculo inicialmente para el drill pipe.

TABLA 17: DATOS DEL ESPACIO ANULAR DEL DRILL PIPE

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	OD (in)
27	Drill pipe	1500	4920,000	6,625

Fuente: Programa de Perforacion Pozo HCY-2, (2015)

Reemplazando datos:

$$Cap_{Dp} = \frac{(ID_p)^2 - (OD_{Dp})^2}{1029,4}$$

$$Cap_{Dp} = \frac{18,75^2 - 6,625^2}{1029,4}$$

$$Cap_{Dp} = 0,299 \text{ bbl/ft}$$

$$Vol_{Dp} = Cap_{Dp} \times h_{Dp}$$

$$Vol_{Dp} = 0,299 \times 4920,000$$

$$Vol_{Dp} = 1471,080 \text{ bbl}$$

Se realizó el mismo procedimiento para determinar la capacidad y volumen del fluido de perforación en las 14 secciones del espacio anular, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 18: CAPACIDAD Y VOLUMEN DEL BHA EN EL ESPACIO ANULAR

N°	TIPO	LONGITUD	(PIE)	OD (IN)	CAPACIDAD (BBL)	VOLUMEN (BBL)
14	Vertical drilling	0,63	2,066	9	0,219	0,452
15	Vertical drilling	10,42	34,178	9,62	0,208	7,109
16	Stabilizer	2,1	6,888	9,5	0,210	1,446
17	MWD	8,75	28,700	9,5	0,210	6,027
18	Sub	3,19	10,463	9,5	0,210	2,197
19	Drill collar	81,6	267,648	9,5	0,210	56,206
20	Jar	9,59	31,455	9,5	0,210	6,606
21	Drill collar	28,05	92,004	9,5	0,210	19,321
22	Sub	1,07	3,510	8	0,235	0,825
23	Drill collar	28,5	93,480	8	0,235	21,968
24	Sub	1,11	3,641	8	0,235	0,856
25	Heavy weight	57,14	187,419	6,625	0,255	47,792
26	Drill pipe	1627,85	5339,348	6,625	0,255	1361,534
27	Drill pipe	1500	4920,000	6,625	0,299	1471,080
	TOTAL	3360	11020,800		3,201	3003.419

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se tiene un volumen total de 3003.419 bbl en el espacio anular.

El volumen total del fluido de perforación en el espacio interior y el espacio anular a una profundidad de 3360 m es de:

$$V_T = V_I + V_a$$

$$V_T = 359,856 + 3003,419$$

$$V_T = 3363.275 \text{ bbl}$$

A continuación, se detalla los cálculos de hidráulica para los fluidos formulados.

3.5.1.1.6.1. HIDRÁULICA DEL FLUIDO BASE

En la tabla 19, se muestra las propiedades reológicas del fluido base, las mismas que se consideran para el análisis hidráulico.

TABLA 19: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO BASE

PROPIEDADES	VALORES
Densidad (lb/gal)	9,2
Viscosidad Plástica (cP)	13
Yield Point (lb/100 ft ²)	20

Fuentes: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio

- **Espacio interior**

Se realizó el cálculo inicialmente para el drill pipe

Valores de “n” y “k” se obtuvieron del software MUDWARE ver figura 41.

$$n_p = 0.615$$

$$k_p = 0.5411$$

Velocidad media (pie/min)

$$V_p = \frac{24,48 \times 950}{5.901^2}$$

$$V_p = 667.857 \text{ pie/min}$$

Viscosidad efectiva

$$\mu_{ep} = 100 \times k_p \times \left(\frac{1,6 \times V_p}{ID} \right)^{(n_p-1)} \times \left(\frac{3n_p + 1}{4n_p} \right)^{(n_p)}$$

$$\mu_{ep} = 100 \times 0.5411 \left(\frac{1.6 \times 667.857}{5.901} \right)^{(0.615-1)} \times \left(\frac{(3 \times 0.615) + 1}{4 \times 0.615} \right)^{(0.615)}$$

$$\mu_{ep} = 7.995 \text{ cP}$$

Numero de Reynold

$$N_{Rep} = \frac{15,467 \times V_p \times ID \times \rho}{\mu_{ep}}$$

$$N_{Rep} = \frac{15.467 \times 667.857 \times 5.901 \times 9.2}{7.995}$$

$$N_{Rep} = 70143.033 \rightarrow \text{flujo turbulento}$$

Factor de fricción

$$f_p = \frac{\frac{\log n + 3.93}{50}}{N_{Rep}^{\left(\frac{1.75 - \log n}{7}\right)}}$$

$$f_p = \frac{\frac{\log 0.615 + 3.93}{50}}{70143.033^{\left(\frac{1.75 - \log 0.615}{7}\right)}}$$

$$f_p = 0.003264$$

Pérdida de presión (psi)

$$P_p = \frac{f_p \times V_p^2 \times \rho}{92916 \times ID} \times L_m$$

$$P_p = \frac{0.003264 \times 667.857^2 \times 9.2}{92916 \times 5.901} \times 10259.348$$

$$P_p = 250.616 \text{ psi}$$

Se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de las secciones posteriores, como se muestran a continuación.

TABLA 20: HIDRÁULICA DEL FLUIDO BASE EN EL ESPACIO INTERIOR

N°	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pies)	ID (in)	Velocidad media (pies/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Número de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
1	Drill pipe	3127,85	10259,348	5,901	667,857	7.995	70143.033	Turbulento	0.003264	250.616
2	Heavy weight	57,14	187,419	4,499	1148,955	5.845	125842.811	Turbulento	0.002771	15.088
3	Sub	1,11	3,641	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	1.741
4	Drill collar	28,5	93,480	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	44.703
5	Sub	1,07	3,510	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	1.678
6	Drill collar	28,05	92,004	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	43.997
7	Jar	9,59	31,455	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	15.042
8	Drill collar	81,6	267,648	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	127.992
9	Sub	3,19	10,463	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	5.003
10	MWD	8,75	28,700	5,900	668,084	7.994	70163.759	Turbulento	0.003264	13.725
11	Stabilizer	2,1	6,888	3,000	2584,000	3.660	301388.441	Turbulento	0.002170	3.294
12	Vertical drilling	10,42	34,178	7,030	470,570	9.787	48097.653	Turbulento	0.003628	16.344
13	Vertical drilling	0,63	2,066	6,750	510,420	9.338	52501.474	Turbulento	0.003540	0.988
TOTAL										540.211

Fuente: Elaboración propia

- **Espacio anular**

Se realizó el cálculo inicialmente para el drill pipe

Valores de “n” y “k” se obtuvieron del software MUDWARE ver figura 41.

$$n_a = 0.615$$

$$k_a = 0.5411$$

Velocidad media (pie/min)

$$V_a = \frac{24,48 \times Q}{ID_{CS}^2 - OD_P^2}$$

$$V_a = \frac{24,48 \times 950}{18,75^2 - 6,625^2}$$

$$V_a = 75,587 \text{ pie/min}$$

Viscosidad efectiva (cP)

$$\mu_{e_a} = 100 \times k_a \times \left(\frac{1,6 \times V_a}{ID_{CS} - OD_P} \right)^{(n_a-1)} \times \left(\frac{3n_a + 1}{4n_a} \right)^{(n_a)}$$

$$\mu_{e_a} = 100 \times 0.5411 \times \left(\frac{1,6 \times 75,587}{18,75 - 6,625} \right)^{(0.615-1)} \times \left(\frac{(3 \times 0.615) + 1}{(4 \times 0.615)} \right)^{(0.615)}$$

$$\mu_{e_a} = 24.408 \text{ cP}$$

Numero de Reynolds

$$N_{Rea} = \frac{15,467 \times V_a \times (ID_{CS} - OD_P) \times \rho}{\mu_{e_a}}$$

$$N_{Rea} = \frac{15,467 \times 75,587 \times (18,75 - 6,625) \times 9.2}{24.408}$$

$$N_{Rea} = 5343.066 \rightarrow \text{flujo turbulento}$$

Factor de fricción

$$f_a = \frac{\log n + 3.93}{50 N_{Rep}^{\left(\frac{1.75 - \log n}{7}\right)}}$$

$$f_a = \frac{\log 0.615 + 3.93}{50 \times 5343.066^{\left(\frac{1.75 - \log 0.615}{7}\right)}}$$

$$f_a = 0.006715$$

Pérdida de presión (psi)

$$P_a = \frac{f_p \times V_a^2 \times \rho}{92916 \times (ID_{CS} - OD_P)} \times L_m$$

$$P_a = \frac{0.006715 \times 75,587^2 \times 9.2}{92916 \times (18,75 - 6,625)} \times 4920$$

$$P_a = 1.541 \text{ psi}$$

Se realizó el mismo cálculo para las secciones posteriores, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 21: HIDRÁULICA DEL FLUIDO BASE EN EL ESPACIO ANULAR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	OD (in)	Velocidad media (pie/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Numero de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
14	Vertical drilling	0,63	2,066	9	103,245	18.880	6614.239	Turbulento	0.006325	0.001623
15	Vertical drilling	10,42	34,178	9,62	108,823	17.970	6790.359	Turbulento	0.006279	0.032
16	Stabilizer	2,1	6,888	9,5	107,667	18.149	6753.265	Turbulento	0.006289	0.006215
17	MWD	8,75	28,700	9,5	107,667	18.149	6753.265	Turbulento	0.006289	0.026
18	Sub	3,19	10,463	9,5	107,667	18.149	6753.265	Turbulento	0.006289	0.009441
19	Drill collar	81,6	267,648	9,5	107,667	18.149	6753.265	Turbulento	0.006289	0.241
20	Jar	9,59	31,455	9,5	107,667	18.149	6753.265	Turbulento	0.006289	0.028
21	Drill collar	28,05	92,004	9,5	107,667	18.149	6753.265	Turbulento	0.006289	0.083
22	Sub	1,07	3,510	8	96,000	20.266	6403.549	Turbulento	0.006383	0.002152
23	Drill collar	28,5	93,480	8	96,000	20.266	6403.549	Turbulento	0.006383	0.057
24	Sub	1,11	3,641	8	96,000	20.266	6403.549	Turbulento	0.006383	0.002232
25	Heavy weight	57,14	187,419	6,625	88,642	22.015	6230.803	Turbulento	0.006432	0.086
26	Drill pipe	1627,85	5339,348	6,625	88,642	22.015	6230.803	Turbulento	0.006432	2.457
27	Drill pipe	1500	4920,000	6,625	75,587	24.408	5343.066	Turbulento	0.006715	1.541
TOTAL										4.573

Fuente: Elaboración propia

Pérdida de presión en el espacio interior y espacio anular

$$P_{PT} = P_P + P_a$$

$$P_{PT} = 540.211 + 4.573$$

$$P_{PT} = 544.784 \text{ psi}$$

Se tiene una pérdida de presión en el espacio interior y el anular de 544.784 psi que es generada por la fricción entre las partículas del fluido y las paredes de la tubería la misma que debe ser superada para mover el fluido de fondo de pozo hasta superficie. Un flujo turbulento en el espacio anular puede tener efectos significativos sobre la eficiencia y seguridad de la operación.

Densidad equivalente de circulación

$$ECD = \rho + \frac{P_a}{0,052 \times TVD}$$

$$ECD = 9,2 + \frac{4.573}{0,052 \times (11020.8)}$$

$$ECD = 9.208 \text{ lb/gal}$$

El valor obtenido de la densidad equivalente de circulación es 9.208 lb/gal, siendo la densidad verdadera que será ejercida en las paredes del pozo, la misma se encuentra dentro de la ventana de perforación.

Limpieza del pozo

$$V_{st} = 0,45 \times \left(\frac{PV}{\rho_L \times D_P} \right) \times \left(\sqrt{\left(\frac{36800 \times \rho_L \times D_P^3 \times (\rho_P - \rho_L)}{PV^2} + 1 \right)} - 1 \right)$$

$$V_{st} = 0,45 \times \left(\frac{13}{9,2 \times 0,2} \right) \times \left(\sqrt{\left(\frac{36800 \times 9,2 \times 0,2^3 \times (18,326 - 9,2)}{13^2} + 1 \right)} - 1 \right)$$

$$V_{st} = 35.402$$

$$F_T = 1 - \frac{V_{st}}{V_a}$$

$$F_T = 1 - \frac{35,402}{99,924}$$

$$F_T = 0,646$$

Para determinar la limpieza de pozo inicialmente se realizó el cálculo de la velocidad de asentamiento de los recortes que se encuentra en función del diámetro y densidad de los recortes. Una limpieza eficiente del pozo es cuando la capacidad de acarreo de recortes es mayor que 0,6 y tiende a uno, como resultado se obtuvo un valor de 0,646 el cual indica una limpieza aceptable.

3.5.2. FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

Es importante determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el fluido elaborado cumple con las características de la formación, a continuación, se ilustra los resultados de las pruebas realizadas con la caña de azúcar.

3.5.2.1. BALANCE DE MATERIA DE LA FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

Es esencial determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el fluido formulado cumple con las características de la formación para mitigar la pérdida de circulación, por lo cual se realizó el balance de materia, para determinar su capacidad y efectividad. El material cuenta con una granulometría de 74 μm .

Datos:

$$V_t = 350 \text{ ml}$$

$$\text{Bentonita} \quad \rho_{\text{Ben}} = 2.3 \text{ g/ml}$$

$$\text{Barita} \quad \rho_{\text{Bar}} = 4.2 \text{ g/ml}$$

Hidróxido de potasio $\rho_{\text{KOH}} = 2.04 \text{ g/ml}$

Mil Pac - R $\rho_{\text{PAC}} = 1.6 \text{ g/ml}$

Fibra de caña de azúcar $\rho_{\text{CAÑA}} = 0.22 \text{ g/ml}$

Lodo $\rho_t = 9.2 \text{ lpg}$

$$\rho_t = 9.2 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.103 \text{ g/ml}$$

Para la elaboración de lodo base se tomará un volumen experimental total de 350 ml

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{CAÑA}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_t * \rho_t = V_{\text{Ben}} * \rho_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} * \rho_{\text{Bar}} + V_{\text{Koh}} * \rho_{\text{Koh}} + V_{\text{Pac}} * \rho_{\text{Pac}} + V_{\text{Caña}} * \rho_{\text{Caña}} + V_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

Calculo para la bentonita

La concentración de la bentonita es de 10 lb/bbl, en unidades de g/ml es:

$$C_{\text{Ben}} = 10 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{Ben}} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de la bentonita.

$$m_{\text{Ben}} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{Ben}} = 9.975 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{Ben}} = \frac{m_{\text{Ben}}}{V_{\text{Ben}}} \rightarrow V_{\text{Ben}} = \frac{m_{\text{Ben}}}{\rho_{\text{Ben}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{Ben}} = \frac{9,975 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{Ben}} = 4.337 \text{ ml}$$

Cálculo para Potasa caustica

La concentración de la Potasa caustica es de 1 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{KOH}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de Potasa caustica.

$$m_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{KOH}} = 0.998 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{V_{\text{KOH}}} \rightarrow V_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{\rho_{\text{KOH}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{KOH}} = \frac{0,998 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{KOH}} = 0.471 \text{ ml}$$

Calculo para Mil Pac - R

La concentración del Mil Pac - R es de 0.5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{PAC}} = 0.5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa del Mil Pac - R.

$$m_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{PAC}} = 0.50 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{V_{\text{PAC}}} \rightarrow V_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{\rho_{\text{PAC}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{PAC}} = \frac{0.50 \text{ g}}{1.6 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{PAC}} = 0.3125 \text{ ml}$$

Calculo para la fibra de caña de azúcar

La concentración de la fibra de caña de azúcar es de 5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{caña}} = 5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{caña}} = 0.014 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de la fibra de la caña de azúcar.

$$m_{\text{caña}} = 0.014 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{caña}} = 4.9 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{caña}} = \frac{m_{\text{caña}}}{V_{\text{caña}}} \rightarrow V_{\text{caña}} = \frac{m_{\text{caña}}}{\rho_{\text{caña}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{caña}} = \frac{4.9 \text{ g}}{0.22 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{caña}} = 22.27 \text{ ml}$$

Realizando el balance de masa

$$V_t = V_{Ben} + V_{Bar} + V_{KOH} + V_{PAC} + V_{caña} + V_{H_2O}$$

Reemplazando datos:

$$350 = 4,337 + V_{Bar} + 0,489 + 0,3125 + 22,27 + V_{H_2O}$$

Se despejo el volumen de baritina, obteniéndose:

$$V_{Bar} = 322,5915 - V_{H_2O}$$

Sustituyendo en la fórmula despejada

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + V_{Bar} * \rho_{Bar} + V_{KOH} * \rho_{KOH} + V_{PAC} * \rho_{PAC} + V_{caña} * \rho_{caña} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + (322,5915 - V_{H_2O}) * \rho_{Bar} + V_{KOH} * \rho_{KOH} + V_{PAC} * \rho_{PAC} + V_{caña} * \rho_{caña} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de agua

$$350 * 1,103 = 4,337 * 2,3 + (322,5915 - V_{H_2O}) * 4,2 + 0,471 * 2,12 + 0,3125 * 1,6 + 22,27 * 0,22 + V_{H_2O} * 1$$

$$386,050 = 9,975 + 1354,8843 - 4,2 V_{H_2O} + 0,998 + 0,5 + 4,9 + V_{H_2O}$$

$$4,2 V_{H_2O} - V_{H_2O} = 9,975 + 1354,8843 + 0,998 + 0,5 + 4,9 - 386,050$$

$$3,2 V_{H_2O} = 985,2073$$

$$V_{H_2O} = 307.877 \text{ ml}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de la barita:

$$V_{\text{Bar}} = 322.5915 - V_{H_2O}$$

$$V_{\text{Bar}} = 322.5915 - 307.877$$

$$V_{\text{Bar}} = 14.71 \text{ ml}$$

Obtención de masa de barita

$$\rho_{\text{Bar}} = \frac{m_{\text{Bar}}}{V_{\text{Bar}}} \rightarrow m_{\text{Bar}} = V_{\text{Bar}} * \rho_{\text{Bar}}$$

$$m_{\text{Bar}} = 14.71 * 4,2$$

$$m_{\text{Bar}} = 61.782 \text{ g}$$

Finalmente:

$$m_t = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{KOH}} + m_{\text{PAC}} + m_{\text{caña}} + m_{H_2O}$$

$$m_t = 9.975 + 61.782 + 0.998 + 0.5 + 4.9 + 307.877$$

$$m_t = 386.032 \text{ g}$$

A continuación, se muestra los resultados obtenidos por el balance de materiales.

TABLA 22: RESULTADO DEL LODO BASE CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR			
SUSTANCIA	DENSIDAD (g/ml)	VOLUMEN (ml)	MASA(g)
Barita	4.2	14.71	61.782
Bentonita	2.3	4.337	9.975
KOH	2.04	0.489	0.998
Mil Pac - R	1.6	0.3125	0.5
Fibra mediana de caña de azúcar	0.22	22.27	4.9
AGUA	1	307.877	307.877
TOTAL	1.103	350	386.032

Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2. DENSIDAD

Para determinar la densidad del fluido con fibra de caña de azúcar se utilizó una balanza de lodo, asimismo las pruebas se realizaron en triplicado para tener una mayor exactitud en la toma de datos, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 23: DENSIDAD DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR			
PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO (lb/gal)
9,60	9,55	9,55	9.57

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 23 se muestra los resultados obtenidos del fluido con la fibra mediana, el cual indica una variación en su valor original de 9,2 lb/gal a un valor promedio de 9,57 lb/gal cuando se le adicionó la fibra de caña de azúcar, lo que puede atribuirse a la composición química que naturalmente contiene la caña de azúcar.

3.5.2.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS

La prueba se realizó con el viscosímetro Fann a seis diferentes velocidades, (600, 300, 200, 100 6 y 3 RPM) con el cual se realizó el cálculo de velocidad de corte y tensión de corte, como se presentan a continuación en la tabla 24.

TABLA 24: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

Θ	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
	Θ	Θ	Θ	Θ
600	51	55	54	53.33
300	36	38	37	37
200	29	31	30	30
100	20	22	22	21.33
6	10	10	11	10.33
3	10	9	10	9.67

Fuente: Elaboración propia

Mediante las lecturas del viscosímetro se determinó los parámetros de viscosidad plástica y yield point, los cuales fueron calculados mediante el Software Mudware, que se muestran a continuación en la tabla 25.

TABLA 25: PARÁMETROS DE VISCOSIDAD DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR	
PROPIEDADES	PROMEDIO
Viscosidad Plástica (cP)	16
Yield Point (lb/100 ft ²)	21

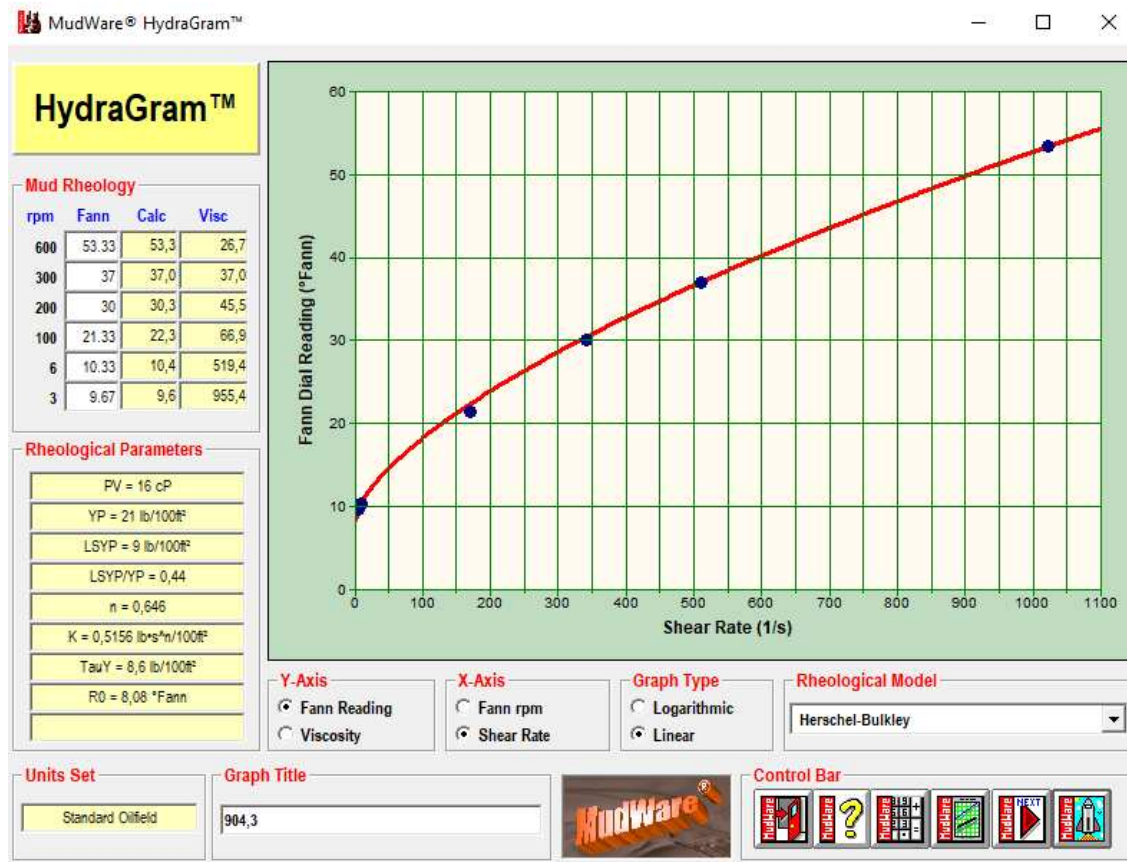
Fuente: Elaboración propia hecho con (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

Los resultados obtenidos muestran que el fluido a base de fibra mediana de caña de azúcar entra en los parámetros reológicos requeridos para perforar la formación.

El contenido de lignina que contiene es el más bajo de los 3 materiales, este bajo porcentaje se ve reflejado en los resultados, donde el fluido no se ve comprometido de forma negativa con la composición química de la caña de azúcar, convirtiéndose en el mejor material natural con el que se experimentó en laboratorio.

Realizaremos la gráfica con el software “Mudware” y determinar el comportamiento reológico del fluido, que se puede ver en la figura 45.

FIGURA 45: COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR



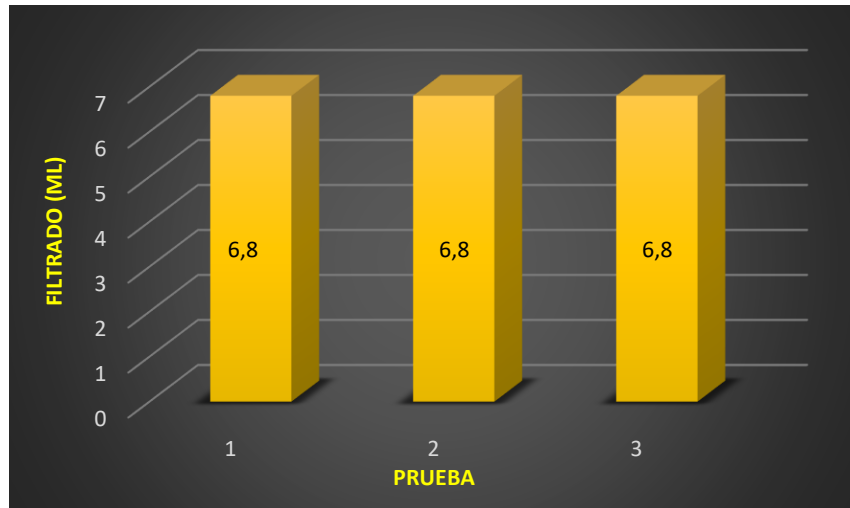
Fuente: Elaboración propia hecha con (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

Según la curva de flujo, muestra un incremento de tensión de corte respecto a la velocidad de corte, por lo que la gráfica se asoció con el modelo de Herschel – Buckley

3.5.2.4. FILTRACIÓN

Con la prueba de filtrado se puede conocer la capacidad de filtrado y la capacidad del fluido de generar un buen revoque. Los datos se tomaron a diferentes tiempos y el filtrado se registró en mililitros como se muestra en la figura 46.

FIGURA 46: RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR



Fuente: Elaboración propia

En la figura 46, según resultados obtenidos, el fluido con fibras medianas de caña de azúcar presenta reducción de pérdida de filtrado con un promedio de 6.8 ml con respecto al fluido base, esta disminución de filtrado se debe al asentamiento de las fibras en las aperturas.

3.5.2.5. MUDCAKE

Los fluidos de perforación, su filtrado y el revoque de lodo son diseños importantes que se consideran para controlar el daño a la formación. La torta de lodo se define como la deposición sólida de las partículas filtradas durante la invasión del lodo de perforación en las rocas porosas. El líquido filtrado y la torta de lodo depositada se caracterizan según el tamaño de las partículas sólidas del lodo, los aditivos del lodo y sus concentraciones. La formación de revoque de lodo ayuda a disminuir la invasión de lodo y aumenta la estabilidad del pozo.

Calculando la densidad de solidos:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{m_{\text{solidos}}}{V_{\text{solidos}}}$$

Cálculo de la masa de solidos:

$$m_{\text{solidos}} = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{Pac}} + m_{\text{caña}}$$

$$m_{\text{solidos}} = 9.975 + 61.782 + 0.5 + 4.9$$

$$m_{\text{solidos}} = 77.157 \text{ g}$$

Cálculo del volumen de solidos:

$$V_{\text{solidos}} = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{caña}}$$

$$V_{\text{solidos}} = 4,337 + 14.71 + 0.3125 + 22.27$$

$$V_{\text{solidos}} = 41.63 \text{ ml}$$

Por tanto, la densidad:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{77.16}{41.63} \quad \rho_{\text{solidos}} = 1.85 \text{ g/ml}$$

Reemplazando en la ecuación 13:

$$\text{Masa húmeda: } m_{\text{húmeda}} = 11.84 \text{ g}$$

$$\text{Masa seca: } m_{\text{seca}} = 3.84 \text{ g}$$

$$\text{Densidad del fluido: } \rho_{\text{fluido}} = 9.57 \text{ g/ml}$$

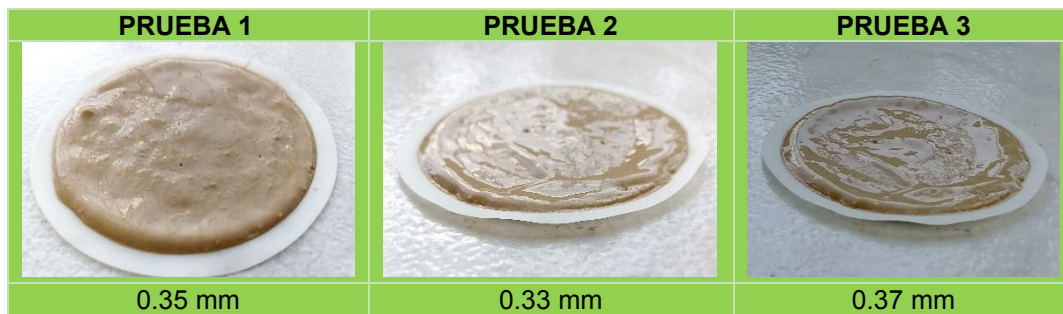
$$\text{Densidad de materiales secos: } \rho_{\text{solidos}} = 1.85 \text{ g/ml}$$

$$\epsilon = \frac{\frac{11.84}{3.84} - 1}{\frac{11.84}{3.84} - 1 + \frac{9.57}{1.85}} \quad : \quad \epsilon = 0.287$$

El valor ϵ no debe pasar la unidad, y mientras sea más cerca de 0 significa que el fluido es demasiado viscoso, al ser de un valor de 0.287 podríamos considerarlo **aceptable**, considerando el hecho de que el valor de filtrado resulto por debajo de los 8 ml.

A continuación, en la figura 47, se muestra los revoques que se obtuvieron en cada prueba.

FIGURA 47: REVOQUE DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR



Fuente: Elaboración propia

3.5.2.6. HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

En la tabla 26, se muestra las propiedades reológicas del fluido con caña de azúcar, las mismas que se consideran para el análisis hidráulico.

TABLA 26: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

PROPIEDADES	VALORES
Densidad (lb/gal)	9.57
Viscosidad Plástica (cP)	16
Yield Point (lb/100 ft ²)	21

Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio y (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

- Espacio interior

TABLA 27: HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL ESPACIO INTERIOR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pies)	ID (in)	Velocidad media (pies/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Número de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
1	Drill pipe	3127,85	10259,348	5,901	667,857	8.893	65596.222	Turbulento	0.003460	276.350
2	Heavy weight	57,14	187,419	4,499	1148,955	6.667	114764.239	Turbulento	0.002963	16.782
3	Sub	1,11	3,641	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	1.962
4	Drill collar	28,5	93,480	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	50.380
5	Sub	1,07	3,510	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	1.892
6	Drill collar	28,05	92,004	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	49.584
7	Jar	9,59	31,455	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	16.952
8	Drill collar	81,6	267,648	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	144.245
9	Sub	3,19	10,463	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	5.639
10	MWD	8,75	28,700	5,900	668,084	8.891	65622.156	Turbulento	0.003460	0.187
11	Stabilizer	2,1	6,888	3,000	2584,000	4.335	264693.140	Turbulento	0.002351	3.712
12	Vertical drilling	10,42	34,178	7,030	470,570	10.710	45720.199	Turbulento	0.003824	0.424
13	Vertical drilling	0,63	2,066	6,750	510,420	10.257	49719.771	Turbulento	0.003734	0.031
TOTAL										568.14

Fuente: Elaboración propia

- Espacio anular

TABLA 28: HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL ESPACIO ANULAR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	OD (in)	Velocidad media (pie/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Numero de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
14	Vertical drilling	0,63	2,066	9	103,245	19.596	6628.855	Turbulento	0.006531	0.001743
15	Vertical drilling	10,42	34,178	9,62	108,823	18.726	6778.286	Turbulento	0.006491	0.034
16	Stabilizer	2,1	6,888	9,5	107,667	18.898	6746.442	Turbulento	0.006499	0.006681
17	MWD	8,75	28,700	9,5	107,667	18.898	6746.442	Turbulento	0.006499	0.028
18	Sub	3,19	10,463	9,5	107,667	18.898	6746.442	Turbulento	0.006499	0.010
19	Drill collar	81,6	267,648	9,5	107,667	18.898	6746.442	Turbulento	0.006499	0.260
20	Jar	9,59	31,455	9,5	107,667	18.898	6746.442	Turbulento	0.006499	0.030
21	Drill collar	28,05	92,004	9,5	107,667	18.898	6746.442	Turbulento	0.006499	0.089
22	Sub	1,07	3,510	8	96,000	20.915	6454.387	Turbulento	0.006579	0.002307
23	Drill collar	28,5	93,480	8	96,000	20.915	6454.387	Turbulento	0.006579	0.061
24	Sub	1,11	3,641	8	96,000	20.915	6454.387	Turbulento	0.006579	0.002393
25	Heavy weight	57,14	187,419	6,625	88,642	22.569	6322.291	Turbulento	0.006617	0.092
26	Drill pipe	1627,85	5339,348	6,625	88,642	22.569	6322.291	Turbulento	0.006617	2.629
27	Drill pipe	1500	4920,000	6,625	75,587	24.816	5466.572	Turbulento	0.006889	1.645
TOTAL										4.891

Fuente: Elaboración propia

Pérdida de presión en el espacio interior y espacio anular

$$P_{PT} = 568.14 + 4.891$$

$$P_{PT} = 573.031 \text{ psi}$$

Al adicionar el material este podría estar generando mayor fricción entre las partículas del fluido que colisionan con las paredes de la tubería en la directa generando un ligero incremento en la pérdida de presión. El flujo turbulento en el espacio anular mejora la capacidad del fluido de perforación para transportar los recortes de roca desde el fondo del pozo hasta la superficie. No obstante, un flujo excesivamente turbulento puede tener efectos significativos sobre la eficiencia y seguridad de la operación.

Densidad equivalente de circulación

$$ECD = 9.57 + \frac{4.891}{0,052 \times 11020,800}$$

$$ECD = 9.578 \text{ lb/gal}$$

Limpieza del pozo

$$V_s = 0,45 \times \left(\frac{16}{9.57 \times 0,2} \right) \times \sqrt{\left(\frac{36800 \times 9.57 \times 0,2^3 \times (18,326 - 9.57)}{16^2} + 1 \right) - 1}$$

$$V_{st} = 33.357$$

$$F_T = 1 - \frac{33.357}{99,924}$$

$$F_T = 0,666$$

Una limpieza eficiente del pozo es cuando la capacidad de acarreo de recortes es mayor que 0,6 y tiende a uno, como resultado se obtuvo un valor de 0,666 el cual indica una limpieza aceptable.

3.5.3. FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

Es importante determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el fluido elaborado cumple con las características de la formación, se ilustra los resultados de las pruebas realizadas con la corteza de cedro, para casos del experimento se tomaron en cuenta diferentes granulometrías y se llevó al mejor resultado siendo un tamaño de 74 μm el cual es presentado a continuación.

3.5.3.1. BALANCE DE MATERIA DE CORTEZA DE CEDRO

Es esencial determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el fluido formulado con un material de granulometría de 74 μm cumple con las características de la formación para mitigar la pérdida de circulación, por lo cual se realizó el balance de materia, para determinar su capacidad y efectividad.

Datos:

$$V_t = 350 \text{ ml}$$

Bentonita $\rho_{\text{Ben}} = 2.3 \text{ g/ml}$

Barita $\rho_{\text{Bar}} = 4.2 \text{ g/ml}$

Hidróxido de potasio $\rho_{\text{KOH}} = 2.04 \text{ g/ml}$

Mil Pac - R $\rho_{\text{PAC}} = 1.6 \text{ g/ml}$

Fibra de corteza de cedro $\rho_{\text{Cedro}} = 1.25 \text{ g/ml}$

Lodo $\rho_t = 9.2 \text{ lpg}$

$$\rho_t = 9.2 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.103 \text{ g/ml}$$

Para la elaboración de lodo base se tomará un volumen experimental total de 350 ml

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{Cedro}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_t * \rho_t = V_{\text{Ben}} * \rho_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} * \rho_{\text{Bar}} + V_{\text{Koh}} * \rho_{\text{Koh}} + V_{\text{Pac}} * \rho_{\text{Pac}} + V_{\text{Cedro}} * \rho_{\text{Cedro}} + V_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

Calculo para la bentonita

La concentración de la bentonita es de 10 lb/bbl, en unidades de g/ml es:

$$C_{\text{Ben}} = 10 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{Ben}} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de la bentonita.

$$m_{\text{Ben}} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{Ben}} = 9.975 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{Ben}} = \frac{m_{\text{Ben}}}{V_{\text{Ben}}} \rightarrow V_{\text{Ben}} = \frac{m_{\text{Ben}}}{\rho_{\text{Ben}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{Ben}} = \frac{9,975 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{Ben}} = 4.337 \text{ ml}$$

Cálculo para Potasa caustica

La concentración de la Potasa caustica es de 1 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{KOH}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de Potasa caustica.

$$m_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{KOH}} = 0.998 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{V_{\text{KOH}}} \rightarrow V_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{\rho_{\text{KOH}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{KOH}} = \frac{0,998 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{KOH}} = 0.471 \text{ ml}$$

Calculo para Mil Pac - R

La concentración del Mil Pac - R es de 0.5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{PAC}} = 0.5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa del Mil Pac - R.

$$m_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{PAC}} = 0.50 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{V_{\text{PAC}}} \rightarrow V_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{\rho_{\text{PAC}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{PAC}} = \frac{0.50 \text{ g}}{1.6 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{PAC}} = 0.3125 \text{ ml}$$

Calculo para la fibra de corteza de cedro

La concentración de la fibra de corteza de cedro es de 5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{cedro}} = 5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{cedro}} = 0.014 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de la fibra de corteza cedro.

$$m_{\text{cedro}} = 0.014 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{cedro}} = 4.9 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{cedro}} = \frac{m_{\text{cedro}}}{V_{\text{cedro}}} \rightarrow V_{\text{cedro}} = \frac{m_{\text{cedro}}}{\rho_{\text{cedro}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{cedro}} = \frac{4.9 \text{ g}}{1.25 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{cedro}} = 3.92 \text{ ml}$$

Realizando el balance de masa

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{cedro}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Reemplazando datos:

$$350 = 4,337 + V_{\text{Bar}} + 0,489 + 0,3125 + 3,92 + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Se despejo el volumen de baritina, obteniéndose:

$$V_{\text{Bar}} = 340.94 - V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Sustituyendo en la fórmula despejada

$$V_t * \rho_t = V_{\text{Ben}} * \rho_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} * \rho_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} * \rho_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} * \rho_{\text{PAC}} + V_{\text{cedro}} * \rho_{\text{cedro}} + V_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_t * \rho_t = V_{\text{Ben}} * \rho_{\text{Ben}} + (340.94 - V_{\text{H}_2\text{O}}) * \rho_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} * \rho_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} * \rho_{\text{PAC}} + V_{\text{cedro}} * \rho_{\text{cedro}} + V_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O}}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de agua

$$350 * 1,103 = 4,337 * 2,3 + (340.94 - V_{\text{H}_2\text{O}}) * 4,2 + 0,471 * 2,12 + 0,3125 * 1.6 + 3,92 * 1.25 + V_{\text{H}_2\text{O}} * 1$$

$$386,050 = 9,975 + 1431.95 - 4,2 V_{\text{H}_2\text{O}} + 0,998 + 0,5 + 4,9 + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$4,2 V_{\text{H}_2\text{O}} - V_{\text{H}_2\text{O}} = 9,975 + 1431.95 + 0,998 + 0,5 + 4,9 - 386,050$$

$$3,2 V_{\text{H}_2\text{O}} = 1062.27$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 331.96 \text{ ml}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de la barita:

$$V_{\text{Bar}} = 340.94 - V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_{\text{Bar}} = 340.94 - 307.877$$

$$V_{\text{Bar}} = 8.98 \text{ ml}$$

Obtención de masa de barita

$$\rho_{\text{Bar}} = \frac{m_{\text{Bar}}}{V_{\text{Bar}}} \rightarrow m_{\text{Bar}} = V_{\text{Bar}} * \rho_{\text{Bar}}$$

$$m_{\text{Bar}} = 8.98 * 4,2$$

$$m_{\text{Bar}} = 37.72 \text{ g}$$

Finalmente:

$$m_t = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{KOH}} + m_{\text{PAC}} + m_{\text{cedro}} + m_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$m_t = 9.975 + 37.72 + 0.998 + 0.5 + 4.9 + 331.96$$

$$m_t = 386.05 \text{ g}$$

A continuación, se muestra los resultados obtenidos por el balance de materiales.

TABLA 29: RESULTADO DEL LODO BASE CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

FLUIDO CON FIBRA DE CEDRO			
SUSTANCIA	DENSIDAD (g/ml)	VOLUMEN (ml)	MASA(g)
Barita	4.2	8.98	37.72
Bentonita	2.3	4.337	9.975
KOH	2.04	0.489	0.998
Mil Pac - R	1.6	0.3125	0.5
Fibra de corteza de cedro	1.25	3.92	4.9
AGUA	1	331.96	331.96
TOTAL	1.103	350	386.05

Fuente: Elaboración propia

3.5.3.2. DENSIDAD

Para determinar la densidad del fluido con fibra de corteza de cedro se utilizó una balanza de lodo, asimismo las pruebas se realizaron en triplicado para tener una mayor exactitud en la toma de datos, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 30: DENSIDAD DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO			
PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO (lb/gal)
8.70	8.75	8.80	8.75

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 30 se muestra los resultados obtenidos del fluido con la fibra de corteza de cedro, el cual indica una variación al valor inicial del fluido base de 9,2 lb/gal a un valor promedio de 8.75 lb/gal cuando se le adicionó la fibra de corteza de cedro, lo que puede atribuirse a la reacción de la composición química que naturalmente contiene el cedro con el fluido, para el caso se le atribuye específicamente al contenido alto en porcentaje de “Taninos” que el cedro contiene el cual podría estar reaccionando con el fluido disminuyendo la densidad y a su vez generando espuma en la mezcla, como se pudo presenciar en laboratorio.

3.5.3.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS

La prueba se realizó con el viscosímetro Fann a seis diferentes velocidades, (600, 300, 200, 100 6 y 3 RPM) con el cual se realizó el cálculo de velocidad de corte y tensión de corte, como se presentan a continuación en la tabla 31.

TABLA 31: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO CON FIBRAS DE CORTEZA DE CEDRO

Θ	Prueba	Prueba	Prueba	Promedio
	1	2	3	
Θ	Θ	Θ	Θ	Θ
600	24	24	24	24
300	14	15	15	14.67
200	10	11	10	10.33
100	6	7	6	6.33
6	1	1	1	1
3	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Mediante las lecturas del viscosímetro se determinó los parámetros de viscosidad plástica y yield point, los cuales fueron calculados mediante el Software Mudware, que se muestran a continuación en la tabla 32.

TABLA 32: PARÁMETROS DE VISCOSIDAD DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO	
PROPIEDADES	PROMEDIO
Viscosidad Plástica (cP)	9
Yield Point (lb/100 ft ²)	5

Fuente: Elaboración propia (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

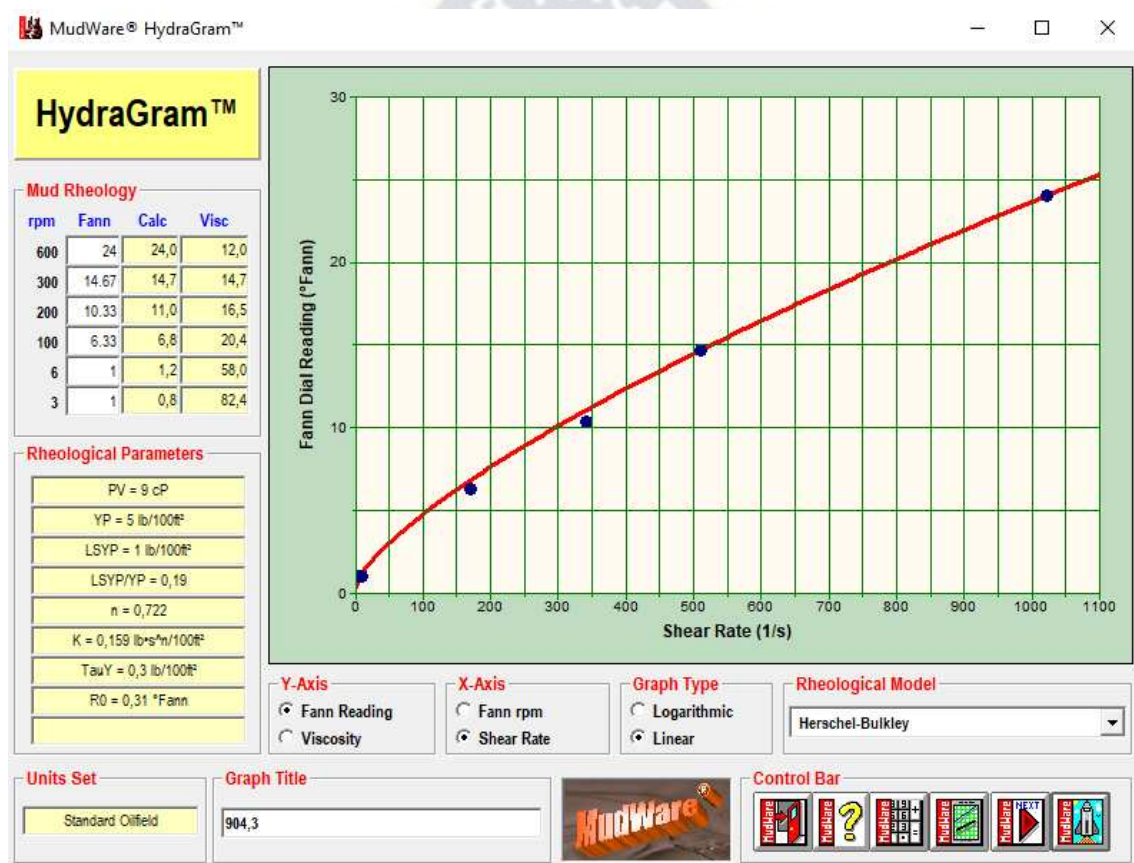
Los resultados obtenidos muestran que el fluido a base de fibra de corteza de cedro no entra en los parámetros reológicos requeridos para perforar la formación esto se lo puede atribuir al porcentaje tan alto de taninos y lignina que este contiene.

Su alto contenido de lignina (entre 26% y 31%), lo convierte en el material menos adecuado como aditivo en fluidos de perforación. Esto debido a que la lignina puede contribuir a la formación de geles viscosos y afectar la fluidez del fluido, haciendo que sea más difícil de manejar y bombear. La reología resulta en ser no deseada, estos compuestos afectan la eficiencia del fluido en perforación, influyendo en la capacidad de filtrado del fluido y en la formación de un tapón eficaz para fracturas, estos resultados se pueden observar en la fig. 49.

Los taninos son compuestos fenólicos con propiedades astringentes estos podrían estar reaccionando con otros aditivos en el fluido, potencialmente afectando su estabilidad y rendimiento.

Realizaremos la gráfica con el software “Mudware” y determinar el comportamiento reológico del fluido, que se puede ver en la figura 48.

FIGURA 48: COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO



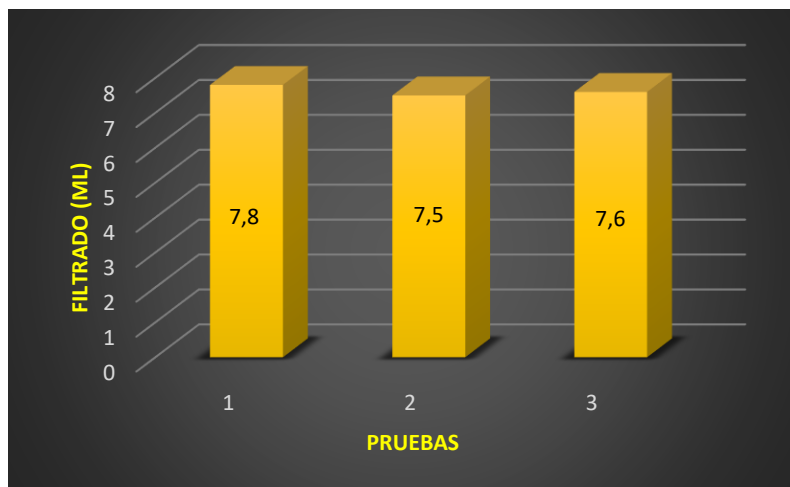
Fuente: Elaboración propia hecha con (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

Según la curva de flujo, muestra un incremento de tensión de corte respecto a la velocidad de corte, por lo que la gráfica se asoció con el modelo de Herschell – Buckley

3.5.3.4. FILTRACIÓN

Con la prueba de filtrado se puede conocer la capacidad de filtrado y la capacidad del fluido de generar un buen revoque. Los datos se tomaron a diferentes tiempos y el filtrado se registró en mililitros como se muestra en la figura 49.

FIGURA 49: RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO



Fuente: Elaboración propia

En la figura 49, según resultados obtenidos, el fluido con fibras de corteza de cedro presenta una mínima reducción de pérdida de filtrado con un promedio de 7.63 ml con respecto al fluido base.

3.5.3.5. MUDCAKE

Los fluidos de perforación, su filtrado y el revoque de lodo son diseños importantes que se consideran para controlar el daño a la formación. La torta de lodo se define como la deposición sólida de las partículas filtradas durante la invasión del lodo de perforación en las rocas porosas. El líquido filtrado y la torta de lodo depositada se caracterizan según el tamaño de las partículas sólidas del lodo, los aditivos del lodo y sus concentraciones. La formación de revoque de lodo ayuda a disminuir la invasión de lodo y aumenta la estabilidad del pozo.

Calculando la densidad de solidos:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{m_{\text{solidos}}}{V_{\text{solidos}}}$$

Cálculo de la masa de solidos:

$$m_{\text{solidos}} = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{Pac}} + m_{\text{cedro}}$$

$$m_{\text{solidos}} = 9.975 + 37.72 + 0.5 + 4.9$$

$$m_{\text{solidos}} = 53.09 \text{ g}$$

Cálculo del volumen de solidos:

$$V_{\text{solidos}} = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{cedro}}$$

$$V_{\text{solidos}} = 4,337 + 8.98 + 0.3125 + 3.92$$

$$V_{\text{solidos}} = 17.55 \text{ ml}$$

Por tanto, la densidad:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{53.09}{17.55} \quad \rho_{\text{solidos}} = 3.02 \text{ g/ml}$$

Reemplazando en la ecuación 13:

$$\text{Masa húmeda: } m_{\text{húmeda}} = 31.26 \text{ g}$$

$$\text{Masa seca: } m_{\text{seca}} = 19.52 \text{ g}$$

$$\text{Densidad del fluido: } \rho_{\text{fluido}} = 8.75 \text{ g/ml}$$

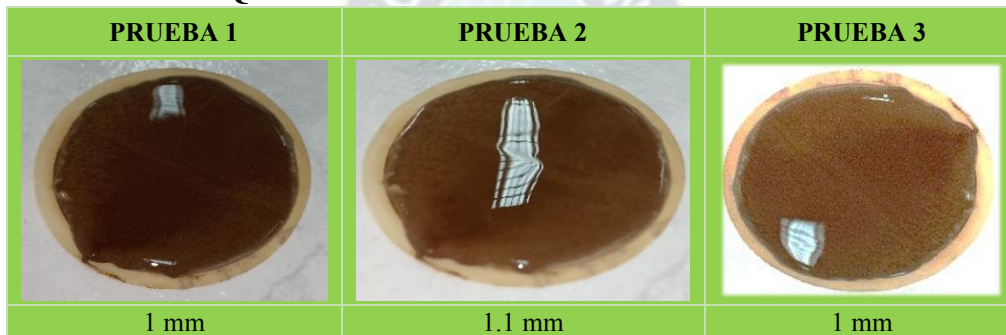
$$\text{Densidad de materiales secos: } \rho_{\text{solidos}} = 3.02 \text{ g/ml}$$

$$\epsilon = \frac{\frac{31.26}{19.52} - 1}{\frac{31.26}{19.52} - 1 + \frac{8.75}{3.02}} : \quad \epsilon = 0.172$$

El valor ϵ no debe pasar la unidad, y mientras sea más cerca de 0 significa que el fluido es demasiado viscoso, al ser de un valor de 0.172 podríamos considerarlo aceptable, pero considerando de que el valor de filtrado resulto por de 7.36 ml, valor muy cercano a los 8 ml.

A continuación, en la figura 50, se muestra los revoques que se obtuvieron en cada prueba.

FIGURA 50: REVOQUE DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO



Fuente: Elaboración propia

3.5.3.6. HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

En la tabla 33, se muestra las propiedades reológicas del fluido con fibra de corteza de cedro, las mismas que se consideran para el análisis hidráulico.

TABLA 33: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO

PROPIEDADES	VALORES
Densidad (lb/gal)	8.75
Viscosidad Plástica (cP)	9
Yield Point (lb/100 ft ²)	5

Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio y (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

- Espacio interior

TABLA 34: HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO EN EL ESPACIO INTERIOR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pies)	ID (in)	Velocidad media (pies/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Número de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
1	Drill pipe	3127,85	10259,348	5,901	667,857	4.004	133207.650	Turbulento	0.003125	228.207
2	Heavy weight	57,14	187,419	4,499	1148,955	3.193	219095.891	Turbulento	0.002731	14.143
3	Sub	1,11	3,641	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	1.706
4	Drill collar	28,5	93,480	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	43.790
5	Sub	1,07	3,510	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	1.644
6	Drill collar	28,05	92,004	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	43.099
7	Jar	9,59	31,455	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	14.735
8	Drill collar	81,6	267,648	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	125.378
9	Sub	3,19	10,463	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	4.901
10	MWD	8,75	28,700	5,900	668,084	4.004	133230.345	Turbulento	0.003124	0.639
11	Stabilizer	2,1	6,888	3,000	2584,000	2.278	460547.239	Turbulento	0.002235	3.227
12	Vertical drilling	10,42	34,178	7,030	470,570	4.634	96613.468	Turbulento	0.003408	0.345
13	Vertical drilling	0,63	2,066	6,750	510,420	4.479	104103.308	Turbulento	0.003340	0.025
TOTAL										481.839

Fuente: Elaboración propia

- Espacio anular

TABLA 35: HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO EN EL ESPACIO ANULAR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	OD (in)	Velocidad media (pie/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Numero de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
14	Vertical drilling	0,63	2,066	9	103,245	7.447	15948.533	Turbulento	0.005545	0.001353
15	Vertical drilling	10,42	34,178	9,62	108,823	7.186	16150.049	Turbulento	0.005526	0.027
16	Stabilizer	2,1	6,888	9,5	107,667	7.238	16105.275	Turbulento	0.005530	0.005198
17	MWD	8,75	28,700	9,5	107,667	7.238	16105.275	Turbulento	0.005530	0.022
18	Sub	3,19	10,463	9,5	107,667	7.238	16105.275	Turbulento	0.005530	0.007895
19	Drill collar	81,6	267,648	9,5	107,667	7.238	16105.275	Turbulento	0.005530	0.202
20	Jar	9,59	31,455	9,5	107,667	7.238	16105.275	Turbulento	0.005530	0.024
21	Drill collar	28,05	92,004	9,5	107,667	7.238	16105.275	Turbulento	0.005530	0.069
22	Sub	1,07	3,510	8	96,000	7.838	15747.213	Turbulento	0.005564	0.001784
23	Drill collar	28,5	93,480	8	96,000	7.838	15747.213	Turbulento	0.005564	0.047
24	Sub	1,11	3,641	8	96,000	7.838	15747.213	Turbulento	0.005564	0.001851
25	Heavy weight	57,14	187,419	6,625	88,642	8.320	15680.490	Turbulento	0.005570	0.071
26	Drill pipe	1627,85	5339,348	6,625	88,642	8.320	15680.490	Turbulento	0.005570	2.023
27	Drill pipe	1500	4920,000	6,625	75,587	8.964	13836.975	Turbulento	0.005762	1.258
TOTAL										3.761

Fuente: Elaboración propia

Pérdida de presión en el espacio interior y espacio anular

$$P_{PT} = 481.839 + 3.761$$

$$P_{PT} = 485.6 \text{ psi}$$

Densidad equivalente de circulación

$$ECD = 8.75 + \frac{3.761}{0,052 \times 11020,800}$$

$$ECD = 8.757 \text{ lb/gal}$$

Limpieza del pozo

$$V_s = 0,45 \times \left(\frac{9}{8.75 \times 0,2} \right) \times \sqrt{\left(\frac{36800 \times 8.75 \times 0,2^3 \times (18,326 - 8.75)}{9^2} + 1 \right)} - 1$$

$$V_{st} = 38.139$$

$$F_T = 1 - \frac{38.139}{99,924}$$

$$F_T = 0,618$$

Una limpieza eficiente del pozo es cuando la capacidad de acarreo de recortes es mayor que 0,6 y tiende a uno, como resultado se obtuvo un valor de 0,618 el cual indica una limpieza aceptable.

3.5.4. POLVO DE HIERBA

Es importante determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el fluido elaborado cumple con las características de la formación, se ilustra los resultados de las pruebas realizadas con el polvo de hierba, para casos del experimento se tomaron en cuenta diferentes

granulometrías y se llevó al mejor resultado siendo un tamaño de 74 μm el cual es presentado a continuación.

3.5.4.1. BALANCE DE MATERIA DEL POLVO DE HIERBA

Es esencial determinar las propiedades reológicas y de filtrado, para comprobar que el fluido formulado con un material de granulometría de 74 μm cumple con las características de la formación para mitigar la pérdida de circulación, por lo cual se realizó el balance de materia, para determinar su capacidad y efectividad.

Datos:

$$V_t = 350 \text{ ml}$$

Bentonita $\rho_{\text{Ben}} = 2.3 \text{ g/ml}$

Barita $\rho_{\text{Bar}} = 4.2 \text{ g/ml}$

Hidróxido de potasio $\rho_{\text{KOH}} = 2.04 \text{ g/ml}$

Mil Pac - R $\rho_{\text{PAC}} = 1.6 \text{ g/ml}$

Polvo de hierba $\rho_{\text{hierba}} = 0.94 \text{ g/ml}$

Lodo $\rho_t = 9.2 \text{ lpg}$

$$\rho_t = 9.2 \frac{\text{lb}}{\text{gal}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = 1.103 \text{ g/ml}$$

Para la elaboración de lodo base se tomará un volumen experimental total de 350 ml

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{hierba}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + V_{Bar} * \rho_{Bar} + V_{Koh} * \rho_{Koh} + V_{Pac} * \rho_{Pac} + V_{hierba} * \rho_{hierba} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

Calculo para la bentonita

La concentración de la bentonita es de 10 lb/bbl, en unidades de g/ml es:

$$C_{Ben} = 10 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{Ben} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de la bentonita.

$$m_{Ben} = 0.0285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{Ben} = 9.975 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{Ben} = \frac{m_{Ben}}{V_{Ben}} \rightarrow V_{Ben} = \frac{m_{Ben}}{\rho_{Ben}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{Ben} = \frac{9,975 \text{ g}}{2.3 \text{ g/ml}}$$

$$V_{Ben} = 4.337 \text{ ml}$$

Cálculo para Potasa caustica

La concentración de la Potasa caustica es de 1 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{KOH}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$
$$C_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa de Potasa caustica.

$$m_{\text{KOH}} = 0.00285 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ml}$$

$$m_{\text{KOH}} = 0.998 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{V_{\text{KOH}}} \rightarrow V_{\text{KOH}} = \frac{m_{\text{KOH}}}{\rho_{\text{KOH}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{KOH}} = \frac{0,998 \text{ g}}{2.12 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{KOH}} = 0.471 \text{ ml}$$

Calculo para Mil Pac - R

La concentración del Mil Pac - R es de 0.5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{PAC}} = 0.5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa del Mil Pac - R.

$$m_{\text{PAC}} = 0.00143 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{PAC}} = 0.50 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{V_{\text{PAC}}} \rightarrow V_{\text{PAC}} = \frac{m_{\text{PAC}}}{\rho_{\text{PAC}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{PAC}} = \frac{0.50 \text{ g}}{1.6 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{PAC}} = 0.3125 \text{ ml}$$

Calculo para el polvo de hierba

La concentración del polvo de hierba es de 5 lb/bbl, en unidades de g/ml su valor es:

$$C_{\text{hierba}} = 5 \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \times \frac{453.6 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}}$$

$$C_{\text{hierba}} = 0.014 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

Mediante el producto del valor de la concentración en g/ml y el volumen experimental se calcula el valor de la masa del polvo de hierba.

$$m_{\text{hierba}} = 0.014 \frac{\text{g}}{\text{ml}} * 350 \text{ ml}$$

$$m_{\text{hierba}} = 4.9 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la fórmula de la densidad, se realizó el despeje de la variable volumen, obteniendo:

$$\rho_{\text{hierba}} = \frac{m_{\text{hierba}}}{V_{\text{hierba}}} \rightarrow V_{\text{hierba}} = \frac{m_{\text{hierba}}}{\rho_{\text{hierba}}}$$

Reemplazando datos:

$$V_{\text{hierba}} = \frac{4.9 \text{ g}}{0.94 \text{ g/ml}}$$

$$V_{\text{hierba}} = 5.21 \text{ ml}$$

Realizando el balance de masa

$$V_t = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{KOH}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{hierba}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Reemplazando datos:

$$350 = 4,337 + V_{\text{Bar}} + 0,489 + 0.3125 + 5.21 + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Se despejo el volumen de baritina, obteniéndose:

$$V_{\text{Bar}} = 339.65 - V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Sustituyendo en la fórmula despejada

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + V_{Bar} * \rho_{Bar} + V_{KOH} * \rho_{KOH} + V_{PAC} * \rho_{PAC} + V_{cedro} * \rho_{cedro} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

$$V_t * \rho_t = V_{Ben} * \rho_{Ben} + (340.94 - V_{H_2O}) * \rho_{Bar} + V_{KOH} * \rho_{KOH} + V_{PAC} * \rho_{PAC} + V_{hierba} * \rho_{hierba} + V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de agua

$$350 * 1,103 = 4,337 * 2,3 + (339.65 - V_{H_2O}) * 4,2 + 0,471 * 2,12 + 0.3125 * 1.6 + 5.21 * 0.94 + V_{H_2O} * 1$$

$$386,050 = 9,975 + 1426.53 - 4,2 V_{H_2O} + 0.998 + 0.5 + 4.9 + V_{H_2O}$$

$$4,2 V_{H_2O} - V_{H_2O} = 9,975 + 1426.53 + 0,998 + 0.5 + 4.9 - 386,050$$

$$3,2 V_{H_2O} = 1056.85$$

$$V_{H_2O} = 330.27 \text{ ml}$$

Reemplazando los datos para la obtención del volumen de la barita:

$$V_{Bar} = 339.65 - V_{H_2O}$$

$$V_{Bar} = 339.65 - 330.27$$

$$V_{Bar} = 9.38 \text{ ml}$$

Obtención de masa de barita

$$\rho_{Bar} = \frac{m_{Bar}}{V_{Bar}} \rightarrow m_{Bar} = V_{Bar} * \rho_{Bar}$$

$$m_{\text{Bar}} = 9.38 * 4,2$$

$$m_{\text{Bar}} = 39.40 \text{ g}$$

Finalmente:

$$m_t = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{KOH}} + m_{\text{PAC}} + m_{\text{hierba}} + m_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$m_t = 9.975 + 39.40 + 0.998 + 0.5 + 4.9 + 330.27$$

$$m_t = 386.04 \text{ g}$$

A continuación, se muestra los resultados obtenidos por el balance de materiales.

TABLA 36: RESULTADO DEL LODO BASE

FLUIDO BASE			
SUSTANCIA	DENSIDAD (g/ml)	VOLUMEN (ml)	MASA(g)
Barita	4.2	9.38	39.40
Bentonita	2.3	4.337	9.975
KOH	2.04	0.489	0.998
Mil Pac - R	1.6	0.3125	0.5
Polvo de hierba	0.94	5.21	4.9
AGUA	1	330.27	330.27
TOTAL	1.103	350	386.04

Fuente: Elaboración propia

3.5.4.2. DENSIDAD

Para determinar la densidad del fluido con polvo de hierba se utilizó una balanza de lodo, asimismo las pruebas se realizaron en triplicado para tener una mayor exactitud en la toma de datos, los resultados se muestran a continuación.

TABLA 37: DENSIDAD DEL FLUIDO CON POLVO DE HIERBA

POLVO DE HIERBA			
PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO (lb/gal)
8.90	8.90	9.0	8.93

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 37 se muestra los resultados obtenidos del fluido con el polvo de hierba, el cual indica una variación en su valor original de 9,2 lb/gal a un valor promedio de 8.93 lb/gal cuando se le adicionó el polvo de hierba, lo que puede atribuirse a la composición química que naturalmente contiene el polvo de hierba, el cual reacciona con el fluido disminuyendo la densidad generando mucha espuma, como se pudo presenciar en laboratorio.

3.5.4.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS

La prueba se realizó con el viscosímetro Fann a seis diferentes velocidades, (600, 300, 200, 100 6 y 3 RPM) con el cual se realizó el cálculo de velocidad de corte y tensión de corte, como se presentan a continuación en la tabla 38.

TABLA 38: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO CON POLVO DE HIERBA

Θ	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
Θ	Θ	Θ	Θ	Θ
600	24	27	25	25.33
300	15	16	15	15.33
200	11	12	10	11
100	6	7	6	6.33
6	1	1	1	1
3	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia

Mediante las lecturas del viscosímetro se determinó los parámetros de viscosidad plástica y yield point, los cuales fueron calculados mediante el Software Mudware, que se muestran a continuación en la tabla 39.

TABLA 39: PARÁMETROS DE VISCOSIDAD DEL FLUIDO CON EL POLVO DE HIERBA

POLVO DE HIERBA	
PROPIEDADES	PROMEDIO
Viscosidad Plástica (cP)	10
Yield Point (lb/100 ft ²)	5

Fuente: Elaboración propia hecho con (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

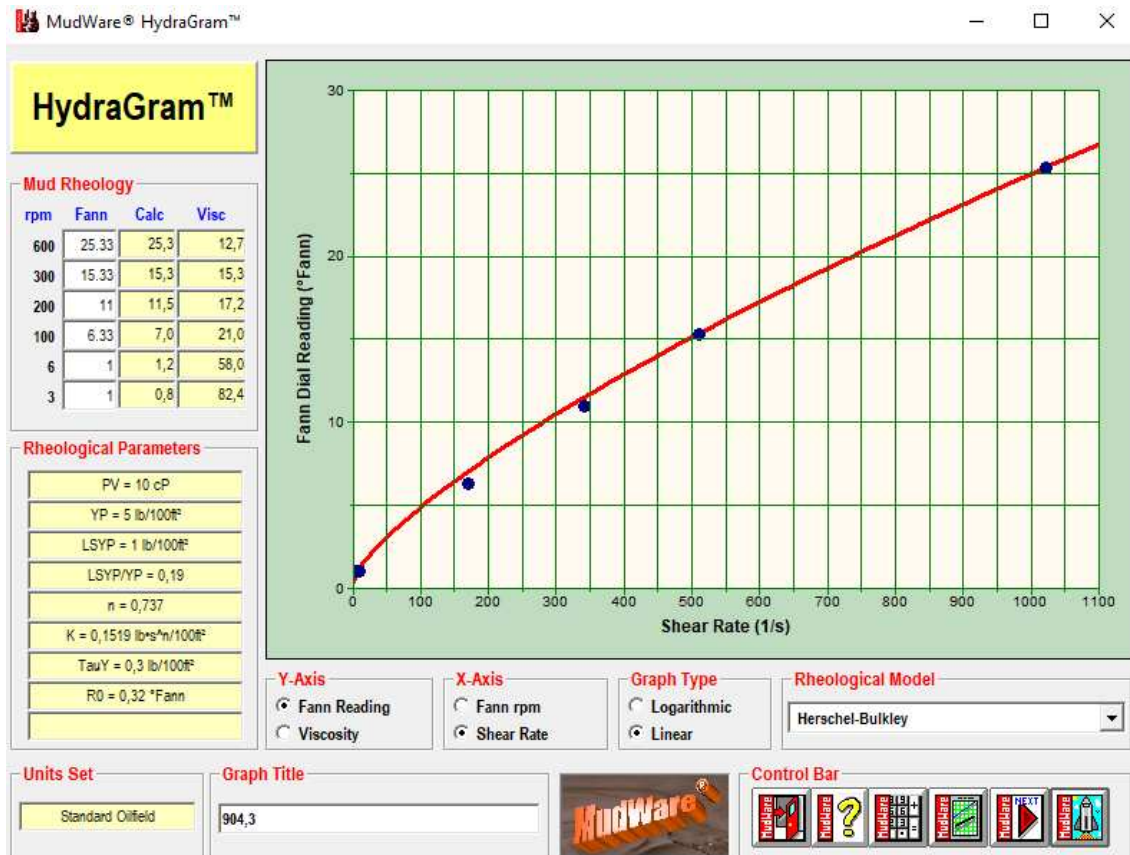
La lignina en la hierba tiene un porcentaje bajo, lo que puede ser beneficioso en términos de evitar la formación de un gel demasiado viscoso, pero puede afectar la capacidad de sellado del fluido, por otra parte, la hierba contiene minerales como el calcio Ca^{++} y Na^+ los cuales podrían estar afectando a los resultados de su reología.

- El calcio: puede inducir a la formación de geles o flóculos, que pueden aumentar la viscosidad del fluido y afectar su capacidad para fluir de manera uniforme, pero también estos pueden tener efectos adversos en la formulación del fluido, como la disminución de la estabilidad y la formación de emulsiones no deseadas. El calcio también puede estar reaccionando con otros compuestos en el fluido, como los polímeros utilizados para controlar la viscosidad y la filtración, como en este caso, podría estar reaccionando con el Mil-pack R.
- El sodio: presente como iones Na^+ , puede influir en la viscosidad del fluido al interactuar con los polímeros. Por ejemplo, el sodio puede afectar la capacidad de los polímeros para formar geles o viscosidades deseadas, lo que puede alterar la viscosidad general del fluido. El sodio puede influir en la estructura de las arcillas, como la bentonita. En concentraciones elevadas, el sodio puede provocar la hinchazón de las arcillas, aumentando la viscosidad del fluido de manera inesperada y afectando la capacidad del fluido para controlar la filtración. Los iones sodio pueden afectar la estabilidad de las emulsiones dentro del fluido de perforación. Esto es especialmente importante en fluidos base agua que utilizan emulsiones para mejorar el rendimiento.

El polvo de hierba también contiene aceites o grasas, estos pueden tener efectos adversos en la formulación del fluido, como la disminución de la estabilidad y la formación de emulsiones no deseadas.

A continuación, realizaremos la gráfica con el software “Mudware” y así poder determinar el comportamiento reológico del fluido, que se puede ver en la figura 51.

FIGURA 51: COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL FLUIDO CON EL POLVO DE HIERBA



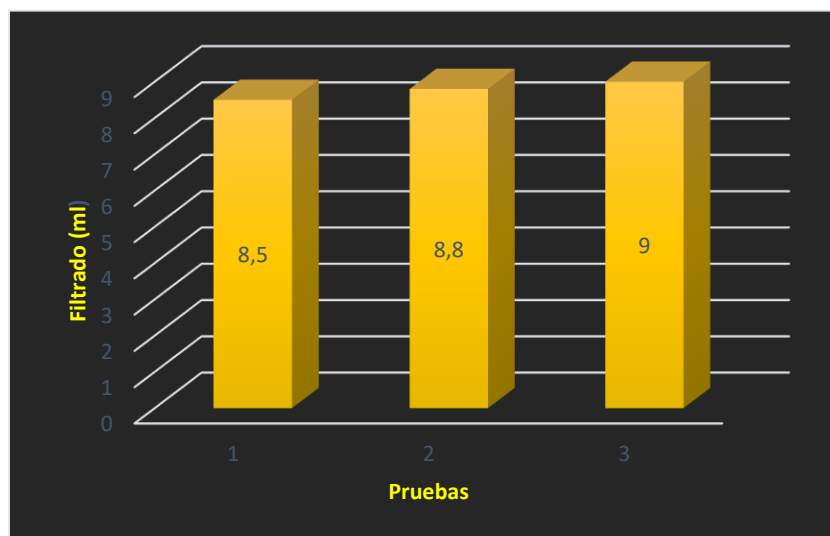
Fuente: Software Mudware, (2023)

Según la curva de flujo, muestra un incremento de tensión de corte respecto a la velocidad de corte, por lo que la gráfica se asoció con el modelo de Herschell – Buckley

3.5.4.4. FILTRACIÓN

Con la prueba de filtrado se puede conocer la capacidad de filtrado y la capacidad del fluido de generar un buen revoque. Los datos se tomaron a diferentes tiempos y el filtrado se registró en mililitros como se muestra en la figura 52.

FIGURA 52: RESULTADOS DE LA FILTRACIÓN DEL FLUIDO CON EL POLVO DE HIERBA



Fuente: Elaboración propia

En la figura 52, según resultados obtenidos, el fluido de polvo de hierba presenta un filtrado con promedio de 8.77 ml con respecto al fluido base. Podemos observar que el resultado no cumple con el requisito de la formación.

3.5.4.5. MUDCAKE

Los fluidos de perforación, su filtrado y el revoque de lodo son diseños importantes que se consideran para controlar el daño a la formación. La torta de lodo se define como la deposición sólida de las partículas filtradas durante la invasión del lodo de perforación en las rocas porosas. El líquido filtrado y la torta de lodo depositada se caracterizan según el tamaño de las partículas sólidas del lodo, los aditivos del lodo y sus concentraciones. La formación de revoque de lodo ayuda a disminuir la invasión de lodo y aumenta la estabilidad del pozo.

Calculando la densidad de solidos:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{m_{\text{solidos}}}{V_{\text{solidos}}}$$

Cálculo de la masa de solidos:

$$m_{\text{solidos}} = m_{\text{Ben}} + m_{\text{Bar}} + m_{\text{Pac}} + m_{\text{hierba}}$$

$$m_{\text{solidos}} = 9.975 + 39.40 + 0.5 + 4.9$$

$$m_{\text{solidos}} = 54.77 \text{ g}$$

Cálculo del volumen de solidos:

$$V_{\text{solidos}} = V_{\text{Ben}} + V_{\text{Bar}} + V_{\text{PAC}} + V_{\text{hierba}}$$

$$V_{\text{solidos}} = 4,337 + 9.38 + 0.3125 + 5.21$$

$$V_{\text{solidos}} = 19.24 \text{ ml}$$

Por tanto, la densidad:

$$\rho_{\text{solidos}} = \frac{54.77}{19.24} \quad \rho_{\text{solidos}} = 2.85 \text{ g/ml}$$

Reemplazando en la ecuación 13:

$$\text{Masa húmeda: } m_{\text{húmeda}} = 24.08 \text{ g}$$

$$\text{Masa seca: } m_{\text{seca}} = 15.18 \text{ g}$$

$$\text{Densidad del fluido: } \rho_{\text{fluido}} = 8.93 \text{ g/ml}$$

$$\text{Densidad de materiales secos: } \rho_{\text{solidos}} = 2.85 \text{ g/ml}$$

$$\epsilon = \frac{\frac{24.08}{15.18} - 1}{\frac{24.08}{15.18} - 1 + \frac{8.93}{2.85}} \quad : \quad \epsilon = 0.158$$

El valor ϵ no debe pasar la unidad, y mientras sea más cerca de 0 significa que el fluido es demasiado viscoso, al ser de un valor de 0.158 podríamos considerarlo un aceptable, pero en las pruebas de filtrado al cabo de 30 min mostro un resultado valor por encima del límite de los 8 ml, el cual es 8.77 ml.

A continuación, en la figura 53, se muestra los revoques que se obtuvieron en cada prueba.



Fuente: Elaboración propia

3.5.4.6. HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON POLVO DE HIERBA

En la tabla 40, se muestra las propiedades reológicas del fluido con polvo de hierba, las mismas que se consideran para el análisis hidráulico.

TABLA 40: PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL FLUIDO CON POLVO DE HIERBA

PROPIEDADES	VALORES
Densidad (lb/gal)	8.93
Viscosidad Plástica (cP)	10
Yield Point (lb/100 ft ²)	5

Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio y (Software de ingeniería MUDWARE, 2023)

- Espacio interior

TABLA 41: HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON POLVO DE HIERBA EN EL ESPACIO INTERIOR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pies)	ID (in)	Velocidad media (pies/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Número de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
1	Drill pipe	3127,85	10259,348	5,901	667,857	4.122	132056.157	Turbulento	0.003187	237.522
2	Heavy weight	57,14	187,419	4,499	1148,955	3.328	214532.572	Turbulento	0.002797	14.783
3	Sub	1,11	3,641	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	1.792
4	Drill collar	28,5	93,480	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	46.011
5	Sub	1,07	3,510	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	1.728
6	Drill collar	28,05	92,004	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	45.284
7	Jar	9,59	31,455	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	15.482
8	Drill collar	81,6	267,648	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	131.736
9	Sub	3,19	10,463	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	5.150
10	MWD	8,75	28,700	5,900	668,084	4.121	132110.706	Turbulento	0.003187	14.126
11	Stabilizer	2,1	6,888	3,000	2584,000	2.417	442990.750	Turbulento	0.002301	3.390
12	Vertical drilling	10,42	34,178	7,030	470,570	4.732	96558.913	Turbulento	0.003467	16.822
13	Vertical drilling	0,63	2,066	6,750	510,420	4.583	103833.894	Turbulento	0.003400	1.017
TOTAL										534.843

Fuente: Elaboración propia

- Espacio anular

TABLA 42: HIDRÁULICA DEL FLUIDO CON POLVO DE HIERBA EN EL ESPACIO ANULAR

Nº	Tipo	Longitud (m)	Longitud (pie)	OD (in)	Velocidad media (pie/min)	Viscosidad efectiva (cP)	Numero de Reynold		Factor de fricción	Pérdida de presión (psi)
14	Vertical drilling	0,63	2,066	9	103,245	7.413	16351.270	Turbulento	0.005589	0.001392
15	Vertical drilling	10,42	34,178	9,62	108,823	7.167	16525.973	Turbulento	0.005573	0.027
16	Stabilizer	2,1	6,888	9,5	107,667	7.216	16486.696	Turbulento	0.005577	0.005350
17	MWD	8,75	28,700	9,5	107,667	7.216	16486.696	Turbulento	0.005577	0.022
18	Sub	3,19	10,463	9,5	107,667	7.216	16486.696	Turbulento	0.005577	0.008126
19	Drill collar	81,6	267,648	9,5	107,667	7.216	16486.696	Turbulento	0.005577	0.208
20	Jar	9,59	31,455	9,5	107,667	7.216	16486.696	Turbulento	0.005577	0.024
21	Drill collar	28,05	92,004	9,5	107,667	7.216	16486.696	Turbulento	0.005577	0.071
22	Sub	1,07	3,510	8	96,000	7.781	16188.8861	Turbulento	0.005604	0.001834
23	Drill collar	28,5	93,480	8	96,000	7.781	16188.8861	Turbulento	0.005604	0.049
24	Sub	1,11	3,641	8	96,000	7.781	16188.8861	Turbulento	0.005604	0.001902
25	Heavy weight	57,14	187,419	6,625	88,642	8.233	16172.168	Turbulento	0.005606	0.073
26	Drill pipe	1627,85	5339,348	6,625	88,642	8.233	16172.168	Turbulento	0.005606	2.078
27	Drill pipe	1500	4920,000	6,625	75,587	8.835	14327.811	Turbulento	0.005791	1.290
TOTAL										3.861

Fuente: Elaboración propia

Pérdida de presión en el espacio interior y espacio anular

$$P_{PT} = 534.843 + 3.861$$

$$P_{PT} = 538.704 \text{ psi}$$

Densidad equivalente de circulación

$$ECD = 8.93 + \frac{3.861}{0,052 \times 11020,800}$$

$$ECD = 8.937 \text{ lb/gal}$$

Limpieza del pozo

$$V_s = 0,45 \times \left(\frac{10}{8.93 \times 0,2} \right) \times \sqrt{\left(\frac{36800 \times 8.93 \times 0,2^3 \times (18,326 - 8.93)}{10^2} + 1 \right) - 1}$$

$$V_{st} = 37.161$$

$$F_T = 1 - \frac{37.161}{99.924}$$

$$F_T = 0,628$$

Una limpieza eficiente del pozo es cuando la capacidad de acarreo de recortes es mayor que 0,6 y tiende a uno, como resultado se obtuvo un valor de 0,628 el cual indica una limpieza aceptable.

CAPITULO 4

4. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

Estos productos de desecho de materiales o alimentos no cuentan con un costo establecido en los mercados en comparación con el costo de los aditivos químicos y los productos ya conocidos en la industria que no suelen ser muy amigables con el medio ambiente. El costo total promedio de las operaciones de perforación es alto, y parte de ese gasto incluye el costo de los fluidos de perforación, que es generalmente el costo más alto en una operación de perforación.

El estudio técnico que se realizara, evaluara la viabilidad técnica que tenga cada material, analizando el comportamiento y resultados que presenten.

4.1. EVALUACIÓN TÉCNICA

La formación Iquiri, es una formación que presentó problemas operacionales durante la perforación, debido a las características litológicas de la misma, presenta una porosidad que varía entre 3% a 4,5% y permeabilidad de un valor aproximado a 0,025 mD. Al atravesar la formación Iquiri en el pozo HCY 2, se presentó pérdida de circulación, donde se registró una pérdida con un volumen de 293 bbl de fluido de perforación. Mediante la prognosis litológica se determinó que la formación Iquiri se encuentra en el tercer intervalo del Pozo HCY 2, dicha formación se perforó con un fluido de perforación base agua que presenta las siguientes características:

TABLA 43: PROPIEDADES GENERALES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

PROPIEDADES GENERALES	
PROPIEDAD	VALORES
Densidad de lodo	9,2 – 10,0 lb/gal
Yield Point	20 - 40 lb / 100 pie ²
VP	10 - 25 Cp
Filtrado API	<8,0 / 30 min
Drilling Solids	<5 %
pH	10,0-10,5

Fuente: Programa de Perforacion Pozo HCY-2, (2015)

Para el siguiente proyecto se elaboró un fluido base agua, con Mil Pac - R debido a la presencia de formaciones reactivas al agua presentes en la formación Iquiri. al cual se adicionó fibra de caña de azúcar, fibra de cedro y polvo de hierba, donde estos prometen presentar características y propiedades que podrían mitigar la pérdida de circulación.

A continuación, se presentarán los resultados generales obtenidos en laboratorio sobre los 3 materiales sometidos a estudio en el presente proyecto, los fluidos de perforación formulados cuentan con las siguientes propiedades y resultados de las diferentes pruebas realizadas en laboratorio.

4.1.1. COMPARACIÓN DE LOS FLUIDOS

4.1.1.1. DENSIDAD

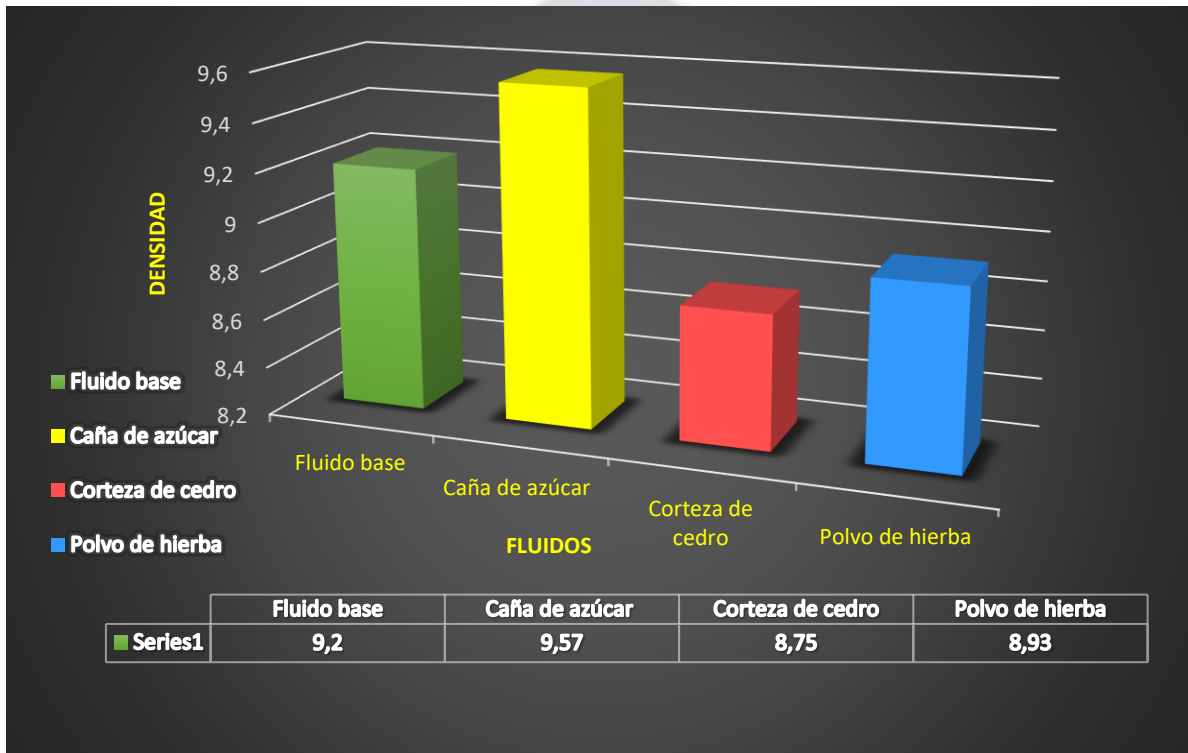
En la tabla 44 se presenta el valor de los resultados de las 3 pruebas realizadas en laboratorio y en la figura 54 una comparativa de los promedios de las densidades de cada uno de los fluidos.

TABLA 44: RESULTADOS DE PRUEBAS DE DENSIDADES

PRUEBAS	FLUIDO BASE	FLUIDO FIBRA CAÑA DE AZÚCAR	FLUIDO FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO	FLUIDO POLVO DE HIERBA
1	9.2	9.60	8.70	8.90
2	9.2	9.55	8.75	8.90
3	9.2	9.55	8.80	9.00

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 54: COMPARATIVA DE DENSIDADES PROMEDIOS DE LOS FLUIDOS



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2. VISCOSIDAD

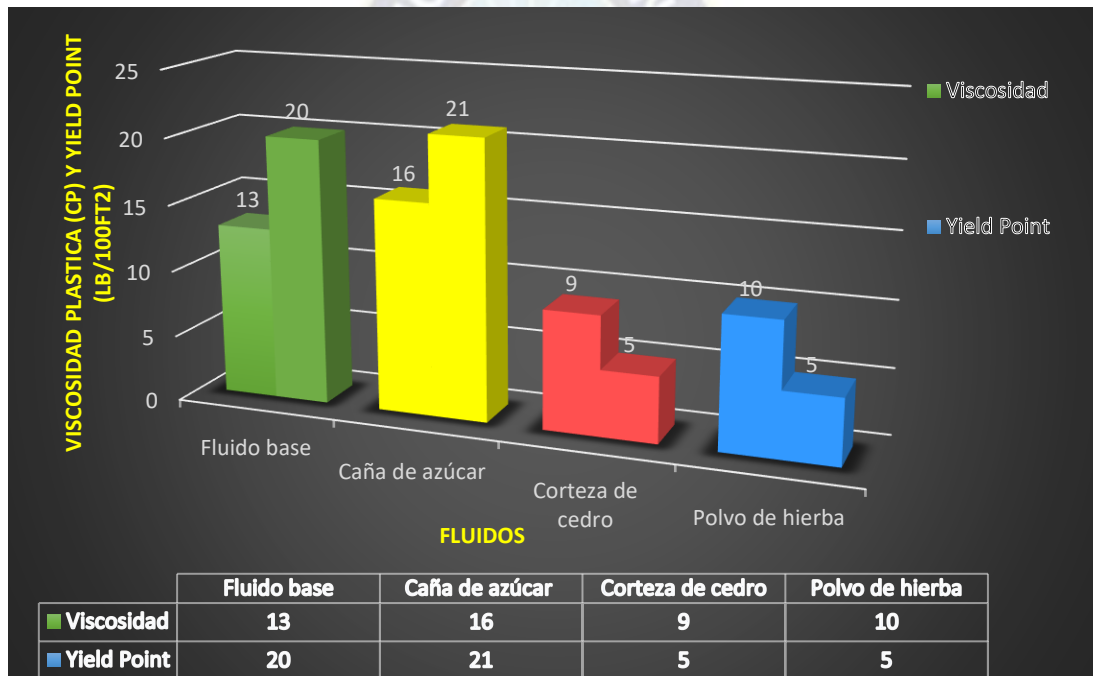
A continuación, se mostrará los resultados reológicos obtenidos con el equipo de laboratorio, donde se realizaron un mínimo de 3 pruebas por material, donde presentaremos el promedio de las pruebas de cada uno de los fluidos. Como se presentará en la siguiente tabla.

TABLA 45: RESULTADOS PROMEDIO DE LAS PRUEBAS DE REOLOGIA DE LOS FLUIDOS

Θ	FLUIDO BASE	FLUIDO FIBRA CAÑA DE AZÚCAR	FLUIDO FIBRA DE CORTEZA DE CEDRO	FLUIDO POLVO DE HIERBA
600	47	53.33	24	25.33
300	33.67	37	14.67	15.33
200	26.33	30	10.33	11
100	20.33	21.33	6.33	6.33
6	10	10.33	1	1
3	11	9.67	1	1

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 55: COMPARACIÓN GRÁFICA DEL PARÁMETRO DEL YIELD POINT Y VISCOSIDAD DEL FLUIDO BASE, CAÑA DE AZÚCAR, FIBRA DE CEDRO Y POLVO DE HIERBA



Fuente: Elaboración propia

- El fluido base (color verde), presenta un valor de yield point y viscosidad de 20 (lb/100ft²) y 13 (cP) respectivamente, el cual se encuentra dentro de los parámetros de viscosidad del fluido utilizado en la formación Iquiri.
- Al adicionar la fibra de caña (color amarillo), se registra con un yiel point y viscosidad de 21 (lb/100ft²) y 16 (cP) respectivamente, indicando un incremento en comparación con el fluido

base, este fluido prueba ser el más óptimo de todo debido a que cumple con todos los márgenes y requisitos que la formación requiere.

- El fluido con fibra de cedro (color rojo), presenta un yield point y viscosidad de 5 (lb/100ft²) y 9 (cP) respectivamente, esto se debe a que la composición de la madera de cedro contiene taninos y un porcentaje muy alto en lignina, compuestos químicos que disipan las partículas del fluido impidiendo tener un régimen óptimo en el pozo. Esto impide que el fluido pueda cumplir con el punto más bajo del requisito que necesita el pozo.
- El fluido de polvo de hierba (color azul), presenta un registro de yield point y viscosidad de 5 (lb/100ft²) y 10 (cP) respectivamente, cumpliendo con el valor de viscosidad mínimo requerido por el pozo, este resultado a pesar de cumplir con el mínimo requerido registro reacciones del fluido con el polvo de hierba, el cual se le atribuye a la no compatibilidad del fluido con la composición química mineralógica del material el cual afecta al fluido.

4.1.1.3. FILTRADO Y REVOQUE

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de filtrado, las cuales fueron realizadas con requerimiento los cuales son filtrado menor a 8 ml en un tiempo de 30 min. Todas las pruebas se realizaron con una granulometría general de los materiales a 74 micras.

TABLA 46: PRUEBAS DE FILTRADO Y REVOQUE DEL FLUIDO BASE CON FIBRA DE CAÑA, CEDRO Y HIERBA

N°	FLUIDO	FILTRADO (ML)	VOLUMEN PERDIDO (%)
1	Fluido Base	8.00	100
2	Caña de azúcar	6.80	85
3	Corteza de cedro	7.63	95.4
4	Polvo de hierba	8.77	109.6

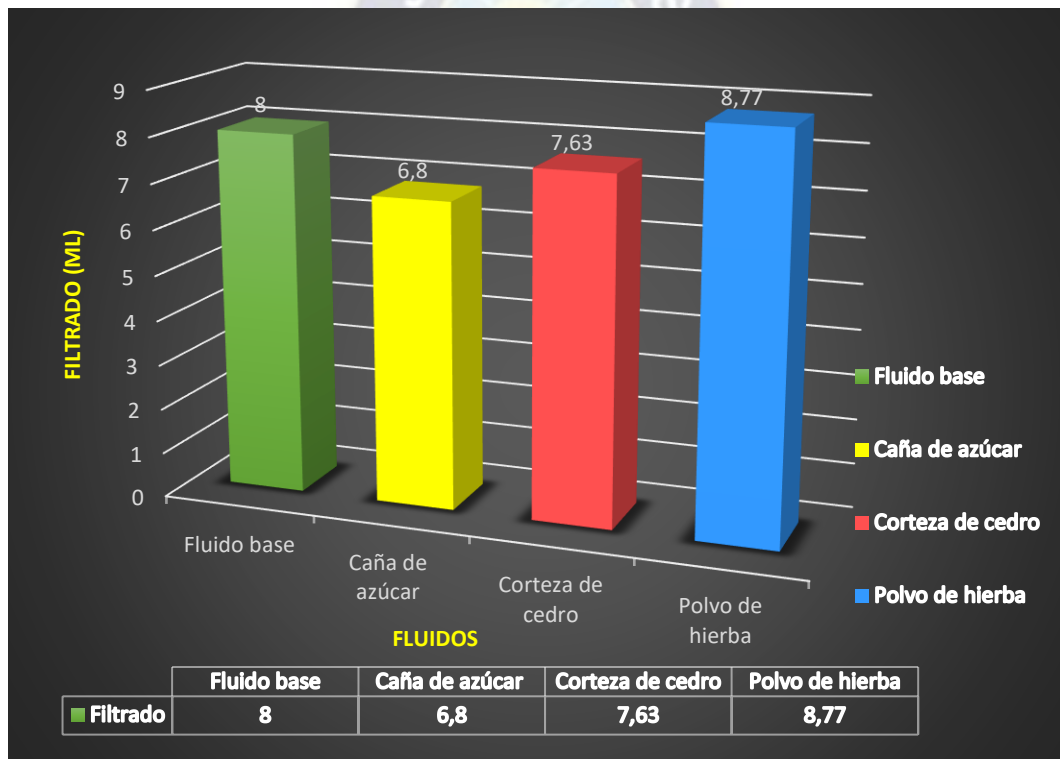
Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio

TABLA 47: PRUEBAS DE REVOQUE DE LOS FLUIDOS

N°	FLUIDO	REVOQUE (MM)
1	Fluido Base	0.3
2	Caña de azúcar	0.4
3	Corteza de cedro	1
4	Polvo de hierba	0.6

Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio

FIGURA 56: COMPARATIVA DEL FILTRADO DE LOS FLUIDOS



Fuente: Elaboración propia

- La adición de la fibra de caña (color amarillo) de azúcar minimiza la pérdida de circulación, debido a que estas fibras logran asentarse en esos espacios porosos reduciendo la pérdida del

fluido y formando revoques delgados, brindando los mejores resultados obtenidos en laboratorio de todos los materiales estudiados.

- La adición de la corteza de cedro (color rojo) con granulometría de 74 micras presenta un filtrado regular y muy cercano al valor mínimo requerido, esto se puede deber idealmente al tamaño de las fibras y sobre todo la característica porcentual química tan alta que contiene, que a su vez dio un revoque medianamente grueso.
- La adición del polvo de hierba (color azul) con granulometría de 74 micras no presenta un buen filtrado, las dos causas son el tamaño de la partícula y su composición química, la reacción del fluido con las características mineralógicas que contiene dio con la obtención de malos resultados en todos los experimentos realizados en laboratorio, el fluido se vio afectado por estas razones, por lo cual el taponamiento no resulto con eficacia.

4.1.1.4. LIMPIEZA DEL POZO

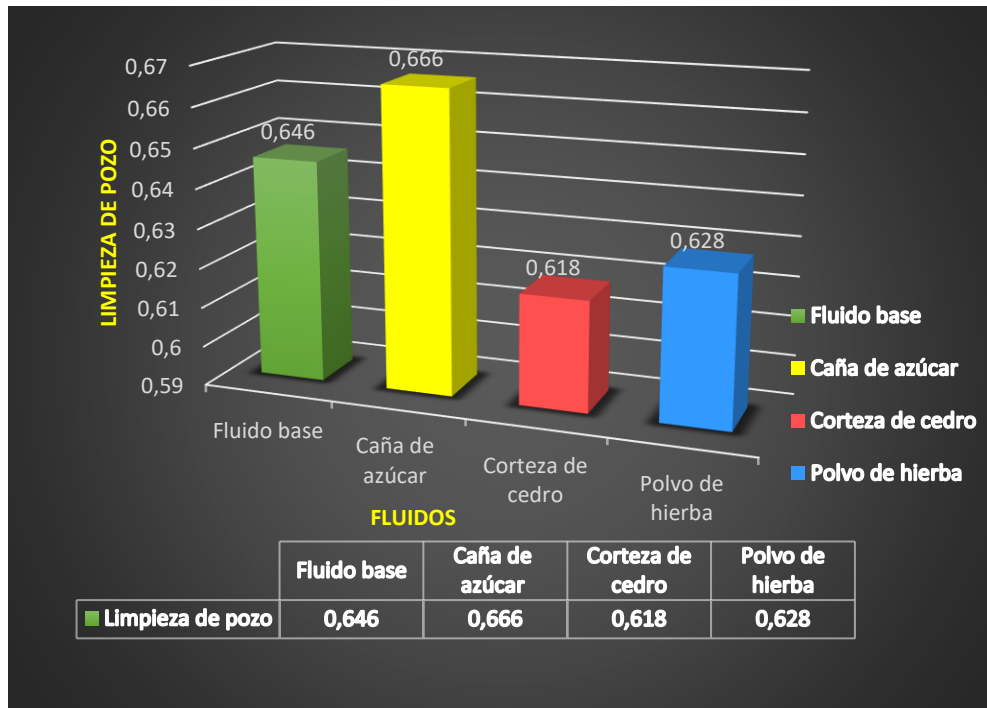
A continuación, se muestra los resultados de los cálculos realizados para la limpieza del pozo.

TABLA 48: RESULTADOS DE LOS CALCULOS DE VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE LOS RECORTES Y LIMPIEZA DE POZO

N°	FLUIDO	VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO	LIMPIEZA DE POZO
1	Fluido Base	35.402	0.646
2	Caña de azúcar	33.357	0.666
3	Corteza de cedro	38.139	0.618
4	Polvo de hierba	37.161	0.628

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 57: COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE LA LIMPIEZA DE POZO



Fuente: Elaboración propia

Para determinar la limpieza de pozo inicialmente se realizó el cálculo de la velocidad de asentamiento de los recortes que se encuentra en función del diámetro y densidad de los recortes. Seguido se calculó la limpieza eficiente del pozo es cuando la capacidad de acarreo de recortes es mayor que 0,6 y tiende a 1, los resultados obtenidos muestran que todos los resultados caen dentro del parámetro de una limpieza de pozo aceptable.

4.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA

De acuerdo con el balance de materia y las concentraciones utilizadas en la elaboración del fluido de perforación, se determinó el porcentaje de cada aditivo presente en el fluido como se puede ver en la tabla 49, estos resultados servirán para determinar la cantidad de aditivo presente en un barril de fluido de perforación.

TABLA 49: PORCENTAJE DE CADA ADITIVO PRESENTE EN EL FLUIDO

Nº	% Bar	% Ben	% KOH	% Pac - R	% Fibra	% Polvo biodegradable	% Agua	% Total
1	4.700	1.239	0.140	0.089	-	-	93.829	100
2	4.203	1.239	0.140	0.089	6.363	-	87.965	100
3	2.566	1.239	0.140	0.089	1.120	-	94.846	100
4	2.680	1.239	0.140	0.089	-	1.488	94.363	100

Fuente: Elaboración propia

4.2.1. COSTO DE LOS MATERIALES FIBROSOS Y EL ADITIVO BIODEGRADABLE

Para el presente proyecto el determinar el valor monetario a cualquiera de los 3 materiales sometidos a estudios en laboratorio es importante por la causa de mostrar una viabilidad económica, por ende las investigación concluyen en el hecho de que los materiales estudiados no cuentan con un mercado o un precio, al ser considerados materiales de desecho orgánico en general no tienen una vida útil en ningún mercado, por ende, los cálculos que se realizaran, tomara el costo de los 3 materiales como un valor que tiende a cero.

Los cálculos de la tabla 50, mostrará el costo unitario de cada aditivo utilizado para la formulación del fluido de perforación, los valores de los precios utilizados para realizar el cálculo para un barril de fluido de perforación son precios internacionales debido a que son los que normalmente se usan al momento de comprar materiales y formular el fluido de perforación.

TABLA 50: COSTO DE ADITIVOS PARA FORMULACIÓN DE CADA FLUIDO

Fluido	Barita	Bentonita	Pac - R	KOH	Agua	Caña de azúcar	Corteza de cedro	Hierba
	\$/Tn	\$/Ton	\$/Tn	\$/Tn	\$/m3	\$/Tn	\$/kg	\$/kg
Fluido con fibra de caña de azúcar	130	200	1600	27.273	10	0	-	-
Fluido con fibra de corteza de cedro	130	200	1600	27.273	10	-	0	-
Fluido con polvo de hierba	130	200	1600	27.273	10	-	-	0

Fuente: Top Billion New Materials (Guangzhou) Co., Ltd, Liaoning Metals and Minerals Enterprise Co., Ltd, Qingdao Oceanview Chemical Co., Ltd, Endeavour Industries Co., Ltd

En la tabla 51, se muestra el costo y la cantidad en masa de cada uno de los aditivos que se adicionó a un barril del fluido de perforación.

TABLA 51: COSTO DE LA CAÑA DE AZÚCAR, CEDRO Y HIERBA

MATERIAL	g/bbl	\$/bbl
Caña de azúcar	4.9	0
Corteza de cedro	4.9	0
Hierba	4.9	0

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el costo total de un barril de fluido de perforación, este se realizó a través del porcentaje de cada aditivo presente en el fluido que se describió anteriormente.

TABLA 52: COSTO TOTAL DE UN BARRIL DEL FLUIDO PROPUESTO

Fluido	Costo de Bar (\$/bbl)	Costo de Ben (\$/bbl)	Costo Pac-R (\$/bbl)	Costo de KOH (\$/bbl)	Costo de Agua (\$/bbl)	Costo de caña de azúcar (\$/bbl)	Costo de corteza de cedro (\$/bbl)	Costo de hierba (\$/bbl)	Costo Total de 1 bbl (\$)
Fluido base	4.080	0.878	0.362	0.009	1.492	-	-	-	6.821
Fibra de caña de azúcar	3.649	0.878	0.362	0.009	1.396	0	-	-	6.294
Fibra de corteza de cedro	2.228	0.878	0.362	0.009	1.508	-	0	-	4.985
Polvo de hierba	2.327	0.878	0.362	0.009	1.500	-	-	0	5.076

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. COSTO DE VOLUMEN DE FLUIDO DE PERFORACIÓN

A continuación, se detalla el costo de un barril del fluido de perforación que fue utilizado en la perforación de la formación Iquiri.

TABLA 53: COSTO DE UN BARRIL DE FLUIDO DE PERFORACIÓN

Fluido de perforación	
Costo \$/bbl	172.731

Fuente: Programa de Fluidos de Perforación Pozo HCY-2, (2015)

El volumen total de fluido utilizado durante la perforación del pozo Huacaya 2, a una profundidad de 3360 m es de 3,363.275 bbl, entonces el costo del fluido de perforación tiene un valor de:

$$\text{Costo del fluido de perforación} = 3.363.275 \text{ (bbl)} * 172.731 \text{ (\$/bbl)}$$

$$\text{Costo del fluido de perforación} = \mathbf{580,941.854 \$}$$

Se realizó el análisis para una posible pérdida de circulación en el pozo HCY 2 en dos escenarios de tiempo (1 y 0.8 hrs) en base al pozo HCY 1, considerando el régimen de pérdida de 120 bbl/hr.

TABLA 54: ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

Tiempo (hrs)	Volumen perdido (bbl)
1	293
0.8	234.4

Fuente: Informe final de perforación pozo HCY 1, (2007)

En un tiempo de **1hrs** se tiene un volumen perdido de 293 bbl que llegaría a ser 50,610.183 \$, este volumen se repone por lo que existe un incremento en el costo total del fluido de perforación.

$$\text{Costo total del fluido de perforación} = 580,941.854 \$ + 50,610.183 \$$$

$$\text{Costo de total del fluido de perforación} = \mathbf{631,552.037 \$}$$

En un tiempo de **0.8 hrs** se tiene un volumen perdido de 234.4 bbl que llegaría a ser 40,488.146 \$, este volumen se repone por lo que existe un incremento en el costo total del fluido de perforación.

$$\text{Costo total del fluido de perforación} = 580,941.854 \$ + 40,488.146 \$$$

$$\text{Costo de total del fluido de perforación} = \mathbf{621,430 \$}$$

4.2.3. COSTOS GENERADOS POR PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

En la tabla 55, se muestra el volumen de fluido de perforación que se evitará perder y el ahorro que generará al adicionar fibras naturales y el aditivo biodegradable.

TABLA 55: COSTO POR PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN EN UN TIEMPO DE 1 HRS

FLUIDO	Volumen perdido (%)	Fluido que se perderá (bbl)	Fluido que se evitará perder (bbl)	Ahorro \$
Fluido de perforación	100	293	0	0
Fibra caña de azúcar	85	243.05	49.95	8627.91
Fibra corteza de cedro	95.4	279.52	13.48	2328.41
Polvo de hierba	109.6	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla 55, en un tiempo de 1 hrs se llegaría a perder 293 bbl del fluido de perforación, al adicionar la fibra de caña de azúcar se disminuye el filtrado en un 15 % por lo que se evitará perder 49.95 bbl generando un ahorro de 8627.91 \$. El fluido de fibra de corteza de cedro se disminuye en un 4.6 % generando un ahorro de 2328.41 \$. El fluido con polvo de hierba no presenta un buen resultado razón por la cual no se realizó el cálculo del costo.

TABLA 56: COSTO POR PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN EN UN TIEMPO DE 0,8 HRS

FLUIDO	Volumen perdido (%)	Fluido que se perderá (bbl)	Fluido que se evitará perder (bbl)	Ahorro \$
Fluido de perforación	100	234.4	0	0
Fibra caña de azúcar	85	199.24	35.16	6073.22
Fibra corteza de cedro	95.4	223.62	10.78	1862.04
Polvo de hierba	109.6	256.90	-	-

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla 54, en un tiempo de 0,8 hrs la pérdida de circulación del fluido de perforación llegaría a un volumen de 234,4 bbl, donde al adicionar fibra de caña de azúcar el fluido

evitará perder mayor cantidad de fluido y generará un mayor ahorro de 6073.22 \$, en comparación con el fluido de fibra de corteza de cedro que genera un ahorro mínimo de 1862.04 \$.

4.2.4. COMPARACIÓN DE COSTOS DEL FLUIDO UTILIZADO EN LA FORMACIÓN IQIRI Y LOS FLUIDOS PROPUESTOS

En la tabla 57, se tiene la diferencia de costos totales entre el fluido de perforación utilizado en la formación Iquiri y los fluidos propuestos.

TABLA 57: COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE EL FLUIDO DE PERFORACIÓN Y LOS FLUIDOS PROPUESTOS

Fluido	Costo total de 1 bbl (\$)	Tiempo de 1 hrs		Tiempo de 0,8 hrs	
		Costo total (\$)	Diferencia (\$)	Costo total (\$)	Diferencia (\$)
Fluido de perforación	172,731	631,552.037	-	621,430.000	-
Fibra caña de azúcar	6.294	21168.453	610383.584	21168.453	600261.547
Fibra corteza de cedro	4.985	16765.926	614786.111	16765.926	604664.074
Polvo de hierba	5.076	17071.984	614480.053	17071.984	604358.016

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 53, el fluido de perforación presenta un costo total de 631,552.037 \$ mientras que todos los fluidos propuestos presentan un menor costo.

4.2.5. ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO

Para el análisis de costo beneficio se medirá la relación entre el coste por unidad de un bien o servicio y el beneficio obtenido por su venta.

- C/B >1 Indica que los beneficios superan los costos, por consiguiente, el proyecto es factible. ESAN, (2017)

- $C/B < 1$ muestra que los costos son mayores que los beneficios, por lo que el proyecto no es factible. ESAN, (2017)

Con este análisis determinaremos si los fluidos generan un beneficio económico. Inicialmente se realizó el cálculo para el fluido de caña de azúcar.

$$C/B = \frac{\text{Ingresos totales netos}}{\text{Costos totales}}$$

$$C/B = \frac{610383.584}{21168.453} = 28.835 > 1$$

Se realizó el mismo procedimiento para los restantes fluidos propuestos.

TABLA 58: ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO

Fluido	Costo- Beneficio (C/B)	
	Tiempo 1 hrs	Tiempo de 0,8 hrs
Fibra de caña de azúcar	28.835 > 1	28.356 > 1
Fibra corteza de cedro	36.669 > 1	36.065 > 1
Polvo de hierba	35.993 > 1	35.401 > 1

Fuente: Elaboración propia

Como la relación costo beneficio es mayor a 1, la aplicación de los fluidos (caña de azúcar, cedro y polvo de hierba) para reducir la pérdida de circulación del fluido de perforación es económicamente rentable y factible.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Con un peso del lodo de 9,2 ppg a una profundidad de 3360 m, se presentó una pérdida de circulación con un volumen de 293 bbl. El fluido utilizado para atravesar esta formación fue un fluido base agua con el sistema Drilplex AR Plus, diseñado para zonas propensas a pérdidas de circulación y lutitas inestables. El diagnóstico de la formación Iquiri en el pozo Huacaya 2 reveló que está compuesta por una secuencia de limolitas, areniscas y lutitas poco consolidadas, que provocaron pérdidas de circulación.
- La selección de los materiales se fundamentó en la facilidad de acceso a los mismos, resultando en un costo de adquisición prácticamente nulo al considerarse desechos. Esta estrategia permitió una formulación económica del fluido de perforación. La caña de azúcar se recolectó de los desechos de jugos, la corteza de cedro se obtuvo en la zona de Guanay y la hierba se recolectó en predios de Cota Cota. Cada material fue secado, triturado y molido, pero debido a las restricciones en el laboratorio y limitaciones con el equipo de molienda impidieron obtener partículas menores, solo se logró procesar a un tamaño máximo de 74 μm . Esta restricción podría influir en la eficacia de los aditivos para fluidos de perforación, ya que tamaños de partícula más finos podrían ofrecer mejores propiedades de rendimiento. La fibra de caña de azúcar, la fibra de cedro y el polvo de hierba tienen un potencial significativo como aditivos en fluidos de perforación, debido a su costo relativamente nulo que deriva de su naturaleza como desecho. No obstante, la eficacia de estos materiales está sujeta a su composición química y su capacidad para resistir altas temperaturas operativas. A temperaturas superiores a 80-90°C,

estos materiales pueden experimentar una degradación considerable, afectando negativamente el rendimiento del fluido de perforación. Aunque la lignina posee propiedades de resistencia al calor y a la degradación química, lo que puede ser ventajoso para mantener la estabilidad del fluido y facilitar la extracción de recortes mientras se evita la obstrucción de la formación, su presencia también puede alterar la viscosidad del fluido, formando geles o redes que complican su bombeo y manejo. Adicionalmente, la lignina puede interactuar con otros aditivos, tales como polímeros y surfactantes, modificando sus propiedades y eficacia. Por lo tanto, las variaciones en el contenido de lignina y en la composición química de cada material influyen de manera significativa en su desempeño dentro del fluido de perforación, como se ha evidenciado en los resultados experimentales.

- Se logró formular un fluido base que simula las características del fluido de perforación usado en el pozo Huacaya 2, cumpliendo con las especificaciones de la formación Iquiri. La formulación incluyó baritina, bentonita, hidróxido de potasio, Mil Pac-R y agua. Para el experimento, el fluido fue reformulado individualmente con tres aditivos diferentes: caña de azúcar, cedro y hierba. El bagazo de caña de azúcar se identificó como el material más compatible para la formulación de fluidos de perforación, debido a su bajo contenido de lignina (entre 4% y 6%) y su mínima influencia en las propiedades del fluido. Además, su composición química, que incluye potasio (K), magnesio (Mg) y cloro (Cl), proporciona beneficios adicionales al fluido, lo cual se reflejó en resultados óptimos de densidad y reología que cumplieron con los requisitos operacionales del pozo. En contraste, el cedro presentó desventajas significativas debido a su alto contenido de taninos (42%) y lignina (26%-31%), lo que se tradujo en un desempeño deficiente en términos de densidad y reología, resultando en

un fluido que no cumplió con las especificaciones del pozo. Por otro lado, aunque el polvo de hierba presenta un bajo contenido de lignina (menos del 10%), su elevado contenido de calcio (Ca^{++}) y sodio (Na^{+}) afectó negativamente la interacción con otros aditivos del fluido, como los polímeros (Mil-pac R) utilizados para controlar la viscosidad y la filtración, lo que llevó a un desempeño insatisfactorio en los parámetros de densidad y reología, conforme a los resultados de laboratorio. Las pruebas de filtrado revelaron resultados satisfactorios para los fluidos formulados con caña de azúcar y cedro, mientras que el fluido basado en polvo de hierba presentó resultados insatisfactorios debido al tamaño de las partículas, ya que la falta de molienda adecuada impidió obtener partículas menores de $74\ \mu\text{m}$, lo que afectó negativamente el filtrado. Experimentos adicionales indicaron que una reducción en el tamaño de las partículas de hierba mejoraba el rendimiento del filtrado. En cuanto a los resultados de revoque, se observó que el fluido con caña de azúcar proporcionó un espesor considerablemente menor en comparación con los fluidos formulados con cedro y hierba. Los lodos que contenían cedro y hierba presentaron viscosidades significativamente mayores, con espesores que duplicaban o triplicaban los del fluido con caña de azúcar.

- La principal ventaja de los materiales utilizados es su aspecto económico, ya que se consideran desechos sin valor en el mercado. El análisis beneficio-coste realizado concluye que los fluidos formulados con fibras naturales y aditivos biodegradables resultan rentables. El análisis comparativo de los fluidos de perforación con diferentes aditivos evidencia que la incorporación de fibra de caña de azúcar optimiza de manera notable las propiedades reológicas del fluido base, incrementando su yield point y viscosidad a $21\ \text{lb}/100\text{ft}^2$ y $16\ \text{cP}$, respectivamente, y cumpliendo así con los parámetros requeridos por la formación Iquiri. Este aditivo no solo

mejora el desempeño del fluido al reducir la pérdida de circulación mediante la formación de un revestimiento delgado, sino que también garantiza la adhesión a los márgenes técnicos establecidos. En contraste, el fluido con fibra de cedro demostró un rendimiento menor debido a la influencia negativa de los compuestos químicos presentes en la corteza, que afectan adversamente su viscosidad y densidad. Del mismo modo, el fluido con polvo de hierba, a pesar de cumplir con el valor mínimo de viscosidad, presenta una mala compatibilidad química y un filtrado deficiente, lo cual compromete su eficacia.

- El fluido formulado con caña de azúcar es el que presenta evaluaciones técnicas y económicas más satisfactorias, cumpliendo plenamente con los requisitos del pozo tanto en términos técnicos como económicos. Por lo que lo vuelve el mejor candidato como aditivo a poder ser aplicado en operaciones de perforación.

5.2. RECOMENDACIONES

- La limpieza rigurosa de equipos en el laboratorio es crucial para asegurar la precisión de los datos. Es fundamental evitar la contaminación del lodo y garantizar que todos los equipos estén debidamente limpios antes de su uso.
- Es imperativo verificar el estado y la calibración de los equipos de laboratorio, dado que se han detectado descalibraciones en balanzas de lodo. La calibración adecuada es esencial para la validez de los resultados experimentales.
- El hidróxido de potasio debe ser introducido al mixer inmediatamente después de pesarlo para evitar su descomposición. Las fibras naturales y aditivos biodegradables deben almacenarse en un ambiente seco y añadirse lentamente durante la formulación para prevenir la adhesión a las paredes del recipiente y minimizar pérdidas.

- La granulometría del material es crucial para la capacidad de filtrado en experimentos. Los materiales fibrosos muestran efectividad en diversas granulometrías, se sugiere buscar un equilibrio porcentual que optimice el taponamiento de fracturas. En el caso de aditivos biodegradables (polvo de hierba), una granulometría menor a 10 μm es recomendada, ya que se observó una reducción en el nivel de filtrado al disminuir el tamaño del polvo.
- Se podrían realizar tratamientos a los materiales investigados para modificar su estructura, métodos con soluciones acidas o alcalinas todo esto podría ayudar a reducir o alterar la lignina con el fin de mejorar la dispersión y compatibilidad en el fluido. Y de igual forma se podrían realizar tratamientos para extraer los taninos de la corteza de cedro para mejorar la compatibilidad del aditivo con el fluido de perforación. Algunas técnicas como la extracción con solventes pueden ayudar a reducir la influencia de los taninos en la estabilidad del fluido
- Considerar el incorporar agentes desfloculantes o dispersantes en la formulación del fluido. Estos aditivos ayudan a mantener la estabilidad y a prevenir la formación de geles o grumos.
- La acetilación de la celulosa, al sustituir grupos hidroxilo por grupos acetilo, incrementa su resistencia térmica al reducir la absorción de agua y mejorar la estabilidad térmica. La incorporación de agentes de cross-linking forma enlaces químicos entre las moléculas de celulosa, fortaleciendo la estabilidad estructural y la resistencia a la degradación térmica de la fibra. Además, el uso de recubrimientos poliméricos, resinas o silicones puede prolongar la vida útil de las fibras vegetales y aditivos biodegradables en aplicaciones a elevadas temperaturas. La eficacia de estos tratamientos varía según la formulación y las condiciones operativas, se sugiere la realización de experimentos con diferentes tratamientos que podría facilitar la viabilidad y diversificación de estos materiales fibrosos y biodegradables.

BIBLIOGRAFÍA

- (2002). En i. L. Moretti, moretti, i., labaume, compartmentalisation of fluid migration pathways in the sub-andean zone , bolivia. 348, 5–24.
- (2015). En programa de perforacion pozo hcy-2. . Repsol e&p bolivia s.a.
- (2018). En informacion nutricional de la panela . Asociacion cumbres de ingapi.
- (2021). En origen y generalidades de los forrajes . Biblioteca de la universidad juan misael saracho.
- (2023). En software de ingeniería mudware. Mi swaco.
- Aemp, a. D. (2010). Identificacion de los eslabones de la cadena productiva del azucar en bolivia. En cadena productiva del azucar.
- Albarado, j. M. (2019). En guía práctica para el cálculo hidráulico y limpieza del pozo. . Instituto politecnico nacional.
- Al-hameedi, a. (2019). Fluidos de perforacion respetuosos con el medio ambiente . En e. U. Universidad de ciencia y tecnología de missouri, datos de fluidos base agua que utilizan aditivos biodegradables generados por desechos. Missouri.
- Alkhalaf, s. A.-y. (2019 march, 26–28). Less damaging drilling fluids: development and lab testing. International petroleum technology conference. Doi:<https://doi.org/10.2523/iptc-19205-ms>
- Al-khdheeawi, e. A. (2019). Apparent viscosity prediction of water-based muds using empirical correlation and an artificial neural network. . Energies, 12(16), 1–10.

- Am.drone4k. (2020). En umsa. Zona cota cota. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?V=8o-yodnakvi>
- Andrade, f. A. (2018). En método inductivo y su refutación deductista. Revista conrado. Obtenido de <http://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado>
- Arteaga, m. (2014). Balanza de lodo. En fluidos de perforacion . F.i. C. Ing. Petrolera u.m.s.a.
- Benedetto, m. D. (2008). En pie de monte de la cuenca de tarija, bolivia.
- Borivoje pašić, n. G.-m. (2007). Wellbore instability: causes and consequences. En rudarsko-geološko-naftni zbornik . Zagreb, croatia: university of zagreb, faculty of mining, geology and petroleum engineering.
- Bourgoyne jr, a. T. (1991). Applied drilling engineering. Spe. Obtenido de <https://store.spe.org/assets/productimages/applieddrillingengineering.jpg>
- Brañez ramos, n. (2019). Elaboracion de fluidos de perforacion para mitigar la pérdida de circualcion en el pozo incahuasi x-3 [trabajo de grado]. Escuela militar de ingenieria.
- Brunet, m. (2020). What drillers need to know about viscosity. National driller. Obtenido de <https://www.nationaldriller.com/articles/91961-what-drillers-need-to-know-about-viscosity>
- Cáceres, m. C. (2008). Identificación de tres especies forestales utilizando . La paz – bolivia: tesis de grado - umsa.

- Cadena iñiguez, p. R.-m.-á.-c.-m.-j. (2017). En cadena iñiguez, p., rendón-medel, r., aguilar-ávila, j., salinas- cruz, e., de lamétodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias.
- Caenn, r. D. (2017). Caenn, r., darley, h., & gray, g. R. (2017). Composition and properties of drilling and completion fluids (7th ed.). Caenn, r., darley, h., & gray, g. R. (2017). Composition and properties of drilling and completion fluids (7th ed.). Gulf professional gulf professional publishing. Obtenido de <https://learning.oreilly.com/library/view/composition-and-properties/9780128050491/>
- Camacho, d. &, & c.a. (2019). En analisis de las variables integradas que influyen en los procesos de fracturameinto hidráulico con el objetivo de la elección de pozos adecuados para este procedimiento en la zona sur del campo castilla. Universidad de americas, facultad de ingenieria.
- Cano tocas, w. E. (2019). Cano tocas, w. Efecto del almidón de papa y naoh en el filtrado api de un fluido de perforación base agua en la industria petrolera. Universidad nacional del centro del Perú, facultad de ingenieria.
- Ciam. (2020). En el empleo de tréboles en ensilados de hierba y pastoreo aumenta la producción de leche. Campogalego.
- Creaf. (2020). Especies de pasto. En tipos de especies de pasto y combinaciones de ellas. Polyfarming.

- Cruz, c. O. (2002). En los sistemas petroleros devónicos del subandino sur y pie de monte de la cuenca de tarija, bolivia. *Journal of south american earth sciences*.
Doi:<https://doi.org/10.1016/>
- Dankwa, o. K.-b. (2018). Evaluating the effects of monovalent and divalent salts on the rheological properties of water based mud. *Open petroleum engineering journal*, 11(1), 98–106.
Petroleum engineering journal, 11(1), 98–106. Doi:
<https://doi.org/10.2174/18748341018110100>
- David hawker, k. V. (marzo, 2001). Procedimientos y operaciones en el pozo, datalog. En k. V. David hawker, manual de perforacion. Alberta, canada.
- Díaz, x. A. (2017). Evaluación técnica financiera para rediseño del fluido base sintética en perforaciones exploratorias en aguas profundas de la cuenca del sinú costa afuera [proyecto de grado]. Fundación universidad de américa.
- Energy api. (2001). Procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. En manual de fluidos de perforación. Instituto americano de petroleo.
- Fernández, c. H. (2014). En metodología de la investigación (6th ed.). McGraw-hill education.
- Fertiglobal. (2021). Programa de gestión de cultivos de la caña de azúcar. En programa de la caña de azúcar. Obtenido de <https://www.fertiglobal.com/es/programas-de-gestion-de-cultivos/programa-de-la-cana-de-azucar/>
- Geological survey of norway. (2015). En structural geology.
<https://www.ngu.no/en/topic/structural-geology>.

Geomecánico, b. D. (15 de enero de 2022). Cotrol de perdida de circulacion.

Gonzales, j. J. (2016). Propiedades físicas del fluido de perforación. Directional driller. Obtenido de <http://juanjgonzalezv.blogspot.com/2016/03/propiedades-fisicas-de-los-fluidos-de.html>

Gowida, a. E. (2020). Newly developed correlations to predict the rheological parameters of high-bentonite drilling fluid using neural networks. Doi:<https://doi.org/10.3390/s20102787>

Hawker, d. (2001). Análisis de las presiones anormales de formación. En datalog..

Iriondo, m. H. (2009). En introducción a la geología (2nd ed.). . Brujas.

Lima, l. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera. En l. Lima, evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera. Universidad autónoma de nuevo león.

Luís fernández t, r. T. (2015). Rendimiento a secano de cuatro clones de caña de azúcar (*saccharum officinarum*) en el municipio de san buenaventura. En producción de cultivos-fertilidad. La paz-bolivia: facultad de agronomía-umsa.

Martha rosales, j. A. (2016). En composición química de las hojas y ramas de *cedrela odorata* l. De dos plantaciones forestales como fuente de materia prima lignocelulósica. Mexico: madera y bosques, instituto de ecología a.c. Doi:doi: 10.21829/myb.2016.2221330

Pennington, t. &. (1968). Manual para la identificación de las principales especies árboles tropicales de méxico. D.f.

- Petróleo, s. D. (2018). Solución viable para perforar a través de pérdidas inducidas en la formación de piedra caliza en. Sociedad de ingenieros de petróleo.
- Petróleo, s. D. (2019). Información sobre aditivos de perforación convencionales y ecológicos: aplicaciones,. Spe.
- Piaf (programa de aprovechamiento forestal, b. (2002). Guía de especies forestales de alto beni. Ceibo.
- Plural, m. D. (2021). En análisis del complejo productivo de la caña de azúcar. La paz - bolivia.
- Rahman, k. M. (2018). Analysis of drilling fluid rheology & pressure drop modelling to improve drilling efficiency [unpublished master`s degree]. . University of calgary.
- Ramsey, m. S. (2019). Rheology, viscosity, and fluid types. En practical wellbore hydraulics and hole cleaning. (págs. Sciencedirect, 217–237.). Doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817088-5.00006-x>
- Review, o. (2012). Estabilizacion del pozo para prevenir perdidas de circulacion . Oilfield review.
- Rey, p. F. (2016). Introduction to structural geology. En in strctural geology.
- Reynaldi, j. M. (2014). En el límite devónico-carbonífero en la cuenca de tarija, bolivia. Su interpretación a partir de datos del subsuelo en el piedemonte chaqueño. . Researchgate.
- Romai, y. (2008). Fluidos de perforacion . En y. Romai, fluidos de perforacion .
- Rubí villegas, r. (2017). La química de los lodos de perforación ejemplos y aplicaciones en ciencias de la tierra [tesis de grado]. Universidad nacional autonoma de méxico.

- Silverio viscarra altamirano, r. L. (1992). Cedro en bolivia . En maderas de bolivia: características y usos de 55 maderas tropicales. Centro de investigaciones de la capacidad de uso mayor de la tierra.
- Suarez-soruco, r. (2000). En compendio de geología de bolivia. In revista técnica de yacimientos petrolíferos fiscales bolivianos.
- Swaco., m.-i. (2014). En drilling fluid system. Mi swaco a schlumberger company. Obtenido de <http://www.gn-decanter-centrifuge.com/mud/drilling-fluid-systemtierra.com>, v. E. (2020).
- Raygras inglés perenne (*lolium perenne*). En las gramíneas o hierbas silvestres.
- Universidad de ciencia y tecnología de missouri, e. U. (2019). Aplicación de un nuevo aditivo ecológico para fluidos de perforación. Elsevier.
- Universidad de ciencia y tecnología de missouri, e. U. (2019). Fluidos de perforacion respetuosos con el medio ambiente. En a. Al-hameedi, datos de fluidos base agua que utilizan aditivos biogradables generados apartir de desechos . Missouri.
- Vryzas, z. &. (2017). En nano-based drilling fluids energies. Energies. Doi:<https://doi.org/10.3390/en10040540>wellbore instability: causes and consequences .
- (2007). En n. G.-m. Borivoje pašić, inestabilidad del pozo: causas y consecuencias. Zagreb, croacia.
- Williamson, d. (2013). En fundamentos de los fluidos de perforación. Oilfield review, 1, 67–69.
- Young, r. (2010). Flickr.

GLOSARIO TÉCNICO

Aditivos: Todo material que se agregue a un fluido de perforación para un propósito en particular.

API: Instituto Estadounidense del petróleo (American Petroleum Institute).

Barril (bbl): Unidad de volumen para productos de petróleo. Un barril equivale a 42 galones US o 0,15699 metros cúbicos. Un metro cubico equivale a 6,2897 barriles. Barril equivalente – unidad de laboratorio que se utiliza para evaluar o ensayar fluidos de perforación. Un gramo de material que se agrega a 350 ml de fluido equivale a 1 libra de material que se le agrega a 1 barril (42 galones) de fluido.

Biodegradabilidad: Es la capacidad que tienen las sustancias y los materiales orgánicos de descomponerse en sustancias más sencillas debido a la actividad enzimática de microorganismos.

Gramínea: Son una familia de plantas (Poaceae) que incluye hierbas, césped y cañas. En la industria petrolera, algunas especies de gramíneas pueden utilizarse en la rehabilitación de terrenos afectados por actividades extractivas, ayudando en la estabilización del suelo y la recuperación de ecosistemas.

Drilplex AR Plus: Es un aditivo formulado para fluidos de perforación en la industria del petróleo. Su propósito es mejorar la estabilidad y la eficiencia del fluido, optimizando la lubricación y la capacidad de enfriamiento, así como minimizando la pérdida de circulación durante el proceso de perforación.

Bagazo: Residuo fibroso que queda tras la extracción de jugos de plantas, especialmente de la caña de azúcar. Compuesto principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, el bagazo se utiliza

en diversas aplicaciones industriales, como la producción de energía, biocombustibles y en la fabricación de papel.

Lignina: Es un polímero tridimensional de fenilpropano que se encuentra en las paredes celulares de las plantas, especialmente en maderas y tejidos leñosos. Proporciona rigidez y resistencia estructural, y juega un papel crucial en la impermeabilidad y la protección de las plantas. En la industria, la lignina se utiliza como materia prima en la producción de biocombustibles, aditivos para la construcción, y en la fabricación de productos químicos y materiales compuestos. Su aprovechamiento también se investiga en procesos de bioenergía y sostenibilidad.

Taninos: Son compuestos fenólicos de origen vegetal que se caracterizan por su capacidad para formar enlaces con proteínas y otras macromoléculas. Tienen propiedades astringentes y antioxidantes, y se encuentran en diversas plantas.

Filtro prensa: Dispositivo que se utiliza para determinar la pérdida de fluido de un fluido de perforación según las especificaciones del API RP 13B.

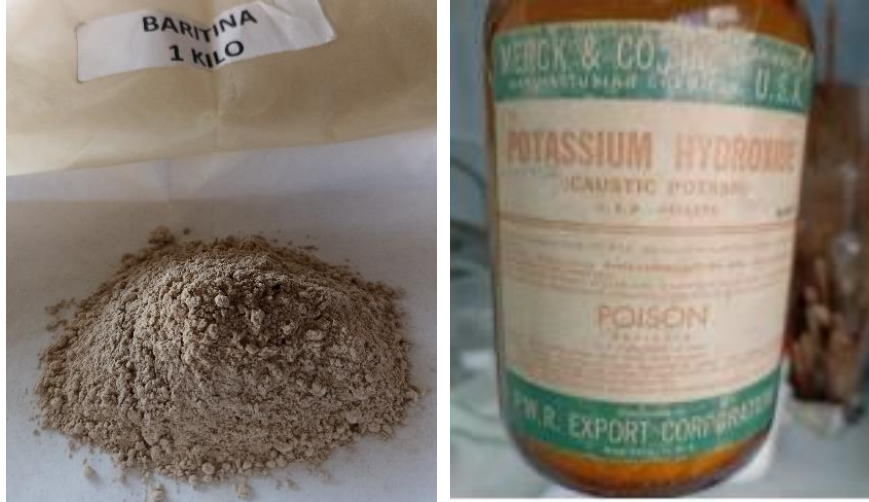
Floculación: Asociación dispersa de partículas en grupos entrelazados débilmente, asociados no paralela de plaquetas de arcilla. En suspensiones controladas, tales como los fluidos de perforación, se forma como gelatina como resultado de la floculación. En ciertos fluidos de perforación, una secuela de la floculación puede ser la precipitación irreversible de coloides y otras sustancias.

Revoque: Sólidos de lodo que deposita por filtración el fluido de perforación en la pared del pozo. Los sólidos en suspensión que se depositan en un medio poroso durante el proceso de filtración

ANEXOS

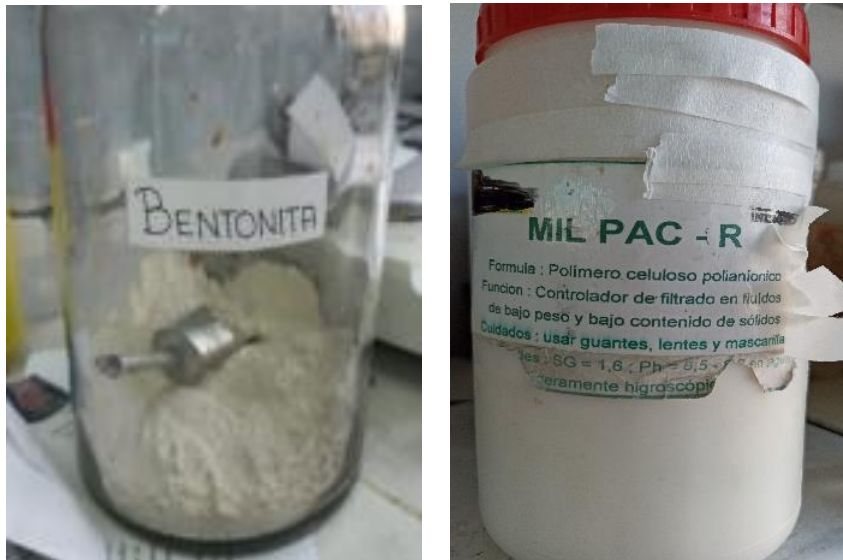
ANEXOS A: Aditivos usados en laboratorio

FIGURA 58: Baritina e hidróxido de potasio



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 59: Bentonita y Mil pac-R



Fuente: Elaboración propia

ANEXOS B: Equipos que se usaron en los experimentos

FIGURA 60: Tamizado de los materiales



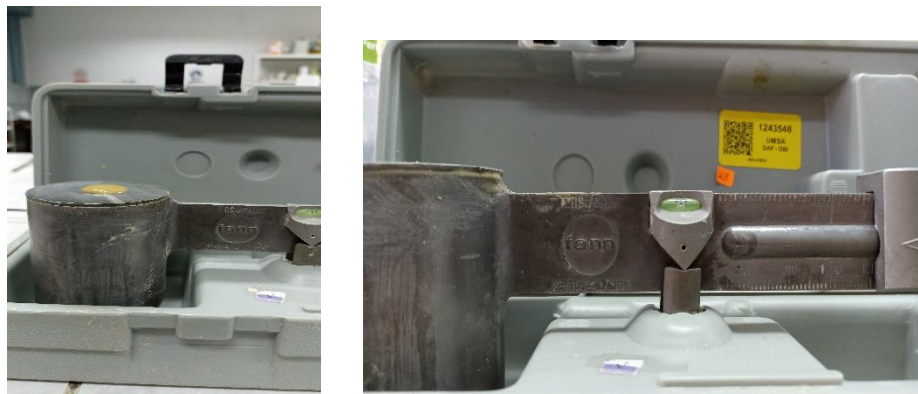
Fuente: Elaboración propia

FIGURA 61: Agitador o mixer de acero inoxidable – mezcla de aditivos



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 62: Determinación de la densidad con balanza de lodo



Fuente: Elaboración propia

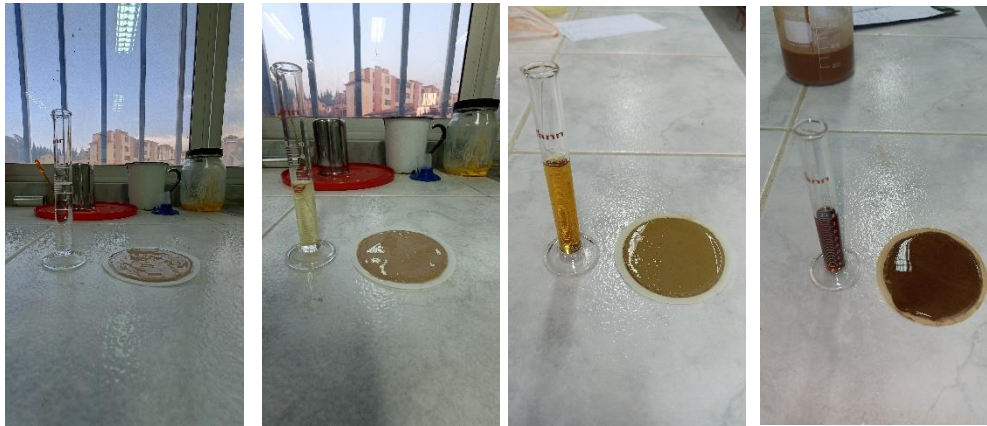
FIGURA 63: Viscosímetro FANN y Filtrado de prensa API



Fuente: Elaboración propia

ANEXOS C: Resultados de las pruebas de filtrado

FIGURA 64: Pruebas de filtrado y revoque



Fuente: Elaboración propia

Nombre: Emerson Eduardo Loayza Vargas

Correo: emer.loayza.206@Gmail.com

Cel: 70549875



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-3632/2024
La Paz, 04 de noviembre de 2024**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **01 de noviembre de 2024**, por **EMERSON EDUARDO LOAYZA VARGAS** con **C.I. N° 9114844 LP**, con número de trámite **DA 2083/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"FORTALECIMIENTO DE POZO DURANTE LA PERFORACIÓN UTILIZANDO MATERIALES A BASE DE FIBRAS NATURALES Y ADITIVOS BIODEGRADABLES PARA LA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN LA FORMACIÓN IQIRI DEL POZO HCY 2."**, 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.

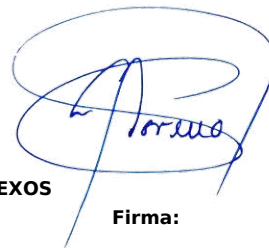
RESUELVE:

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: "**FORTALECIMIENTO DE POZO DURANTE LA PERFORACIÓN UTILIZANDO MATERIALES A BASE DE FIBRAS NATURALES Y ADITIVOS BIODEGRADABLES PARA LA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN LA FORMACIÓN IQUIRI DEL POZO HCY 2.**" a favor del autor y titular: **EMERSON EDUARDO LOAYZA VARGAS** con **C.I. N° 9114844 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:



H45py5Yx1Vx39M

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB 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. Urriolagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles 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

