

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN LODO DE PERFORACIÓN BASE ACEITE
A ESCALA DE LABORATORIO IMPLEMENTANDO ARCILLA ORGANOFÍLICA
MODIFICADA**

JAIME ALEXANDER MURCIA RAIRAN

JAIME ANDRES CALLEJAS FIESCO

Proyecto integral de grado para optar el título de:

INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director

NELSON FERNÁNDEZ BARRERO

Ingeniero químico

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

BOGOTA D.C

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Nelson Fernández Barrero

Firma del director

Firma del presidente jurado

Ing.

Firma del jurado

Ing.

Firma del Jurado

Bogotá D.C. agosto de 2021.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y Rector del claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora académica y de investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMAN

Vicerrector administrativo y financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA

Decano de la facultad

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del programa

Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

DEDICATORIA

Este proyecto de grado va dedicado a Dios que es mi mentor y mi guía espiritual, también a mi familia ya que hacen de mí una mejor persona y un mejor profesional, gracias a ellos que han hecho de mí un ser con valores, virtudes y responsabilidades, En especial a mi madre Diana Patricia Rairan León que es la persona que me apoya en todos mis proyectos, me acompañó durante toda mi carrera profesional y me enseñó que en la vida hay que luchar y esforzarse para resaltar de las demás personas, a mi padre Jaime Eliecer Murcia Triana que es una persona de carácter y me enseñó que lo que uno se propone lo puede lograr, que no hay nada imposible sino personas incapaces, a mi hermana Diana Katalina Murcia Rairan que me guía personal y profesionalmente para resaltar en lo que hago, sus consejos y su apoyo moral siempre están presentes, aunque en ocasiones es de un genio fuerte me enseñó que en la vida hay que forjar carácter y ser responsable en cualquier cosa que uno haga, a mi cuñado Mauricio Vásquez Uribe porque gracias al esfuerzo de mis papas y al apoyo de él pude sacar adelante esta carrera tan única como lo es la ingeniería de petróleos, más adelante y cuando ya sea un profesional espero con la ayuda de Dios cumplir la promesa que le hice de hacer negocios grandes e importantes.

Una mención especial a mis abuelos que algún día me dijeron que querían ver en mí un profesional bueno, honesto y destacado pues acá estoy cumpliendo la promesa que hice cuando apenas era un niño, sé que desde el cielo me acompañan y están orgullosos de la persona que soy y en el profesional me convertiré, siempre están y estarán en mis oraciones, espero nunca decepcionarlos.

A mi compañera sentimental y a mis amigos que me apoyaron en esta etapa tan linda que es la universidad y me dan un impulso de seguir adelante pese a cualquier adversidad, también aprendí que no importa la cantidad de amigos que uno puede tener sino la calidad de ellos.

Finalmente, eternas gracias a las personas que mencione en este apartado, todos son muy importantes en mi vida y espero ser un profesional admirable para que estén aún más orgullosos de mí, la vida me enseñó a que la familia es lo primero y lo más importante que Dios me pudo haber regalado, le agradezco a él por darme la oportunidad y ser merecedor de tan bonito núcleo familiar.

JAIME ALEXANDER MURCIA RAIRAN.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de grado principalmente a mi familia, quienes creyeron en mí desde el principio.

A mi madre María Antonia, que, a pesar de todo, nunca perdió su fe en mí, gracias por apoyarme en cuanto locura se me ha ocurrido.

A mi padre Jaime, que así sea en estos últimos años, vio algo valeroso en mí cuando empecé esta aventura en Bogotá que ahora termina, gracias por enseñarme a discernir entre el bien y el mal.

A mi hermana María Angélica, que pese a lo diferentes que somos, sé que siempre voy a poder contar con ella, gracias por no escucharme y alegrar nuestras vidas con Sara Isabel.

A mi abuela Rubiela, que siempre ha estado ahí para mí, gracias por darme palabras de aliento cuando más las he necesitado.

A mi sobrina, que sin haber nacido ya ocupa un lugar muy importante en mi corazón.

A mis amigos y todas las personas que estuvieron a mi lado en esta etapa de mi vida, aprendí algo diferente de cada uno.

¡Muchas gracias!

JAIME ANDRES CALLEJAS FIESCO

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la institución donde nos forjamos para ser unos profesionales que resalten de los demás, la institución de educación superior **Fundación Universidad de América**, al cuerpo docente y a los directivos puesto que hacen posible que este proyecto investigativo cumpla con los propósitos a lograr.

Se agradece muy especialmente a la ingeniera **Yenny Hernández** coordinadora de los laboratorios de la universidad por interceder ante los directivos de la universidad y así poder tener acceso a las instalaciones del campus de los cerros.

Especiales gracias a la empresa **Qmax** que de alguna manera nos apoyó con material de estudio y de trabajo para lograr evaluar el proyecto y generar conocimiento nuevo, cumplir con lo que se propuso y guiarnos en la metodología de trabajo.

Se agradece al ingeniero **Nelson Fernández Barrero** por su directriz y acompañamiento en los laboratorios de la universidad, aportando el conocimiento y las ganas de sacar el proyecto adelante, además de brindarnos consejos tanto para la práctica como para la vida profesional.

Se agradece a la ingeniera **Elizabeth Plata** de la empresa Qmax por la orientación y el acompañamiento que nos brindó durante el proceso de este proyecto investigativo.

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

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEORICO	14
	14
1.1 Fluidos de perforación	14
1.1.1 <i>Función y utilidad de los fluidos de perforación</i>	15
1.2 Lodos base aceite	18
1.2.1 <i>Utilidad de los lodos base aceite</i>	18
1.3 Ventajas y desventajas OBM	20
1.3.1 <i>Ventajas</i>	20
1.3.2 <i>Desventajas</i>	21
1.4 Aditivos	21
1.5 Arcilla organofílica	24
1.6 Amonios Cuaternarios	24
1.6.1 <i>Cloruro de benzalconio</i>	25
1.6.2 <i>Amonio cuaternario de quinta generación</i>	26
1.7 Pruebas físicas básicas de laboratorio	26
1.7.1 <i>Densidad o peso</i>	26
1.7.2 <i>Reología</i>	27
1.7.3 <i>Porcentaje de líquidos y sólidos</i>	28
1.7.4 <i>Contenido de arenas</i>	29
1.7.5 <i>Potencial de hidrógeno</i>	29
1.8 Pruebas químicas básicas de laboratorio	29
1.8.1 <i>Alcalinidad del lodo</i>	29
1.8.2 <i>Alcalinidad del filtrado</i>	29
1.8.3 <i>Cloruros</i>	30
1.9 Pruebas especiales OBM	30
1.9.1 <i>Estabilidad eléctrica</i>	30
1.9.2 <i>Lubricidad</i>	30

1.9.3 Filtrado HPHT	30
2. METODOLOGÍA Y DATOS	32
2.1 Síntesis de la arcilla organofílica con amonio cuaternario de quinta generación.	32
2.2 Síntesis de la arcilla organofílica con cloruro de Benzalconio	35
2.3 Cuantificación del material	36
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
3.1 Comparación de los resultados de laboratorio	39
3.1.1 Pruebas básicas	39
3.1.2 Pruebas especiales	42
4. ANÁLISIS ECONÓMICO	48
4.1 Costo de la arcilla organofílica preparada con amonio cuaternario de quinta generación.	48
4.2 Costo de la arcilla organofílica preparada con cloruro de benzalconio	49
5. CONCLUSIONES	51
7. BIBLIOGRAFIA	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de los temas y subtemas a tratar en el marco teórico.	14
Figura 2. Representación del transporte de ripios, cortes y derrumbes de fondo a superficie	16
Figura 3. Suspensión de los ripios y material densificante cuando se detiene la circulación.	17
Figura 4. Estructura química de los amonios cuaternarios.	25
Figura 5. Representación de las cadenas alquílicas del benzalconio.	25
Figura 6. Cadena dialquílica lineal del DDAC.	26
Figura 7. Titulación de la solución bentonítica.	32
Figura 8. Masa antes del secado.	33
Figura 9. Arcilla sin moler.	33
Figura 10. Tamizadora.	34
Figura 11. Arcilla organofílica sintetizada.	35
Figura 12. Le chatelier.	37
Figura 13. Reología de las muestras.	43
Figura 14. Relación de líquidos del lodo convencional.	43
Figura 15. Relación de líquidos del lodo benzalconio.	44
Figura 16. Relación de líquidos del lodo amonio.	44
Figura 17. Filtrado HPHT de las muestras.	45
Figura 18. Diagrama de flujo, lodo con amonio	46
Figura 19. Diagrama de flujo, lodo con benzalconio	47

LISTA DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
bbbl	Barriles
cP	Sistema de medida para la viscosidad
PSI	Unidad de medida de la presión correspondiente a libras por pulgada cuadrada
WBM	Lodo de perforación base agua en ingles
OBM	Lodo de perforación base aceite
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados Celsius
CDB	Cloruro de benzalconio
ACQG	Amonio cuaternario de quinta generación
DDAC	Cloruro de alquildodecildimetilamonio
cc	Centímetros cúbicos
ft	Pies
API	Instituto americano de petróleos
cm	Unidad de centímetros
hr	Unidad de hora
kg	Unidad de kilogramo
lb	Unidad de libra
in	Unidad de pulgadas en inglés
LCM	Material de perdida de circulación en inglés
mm	Unidad de milímetros
MW	Peso del fluido en ingles
pf	Alcalinidad del filtrado del fluido
ppg	Unidad de libras por galón en inglés
qt	Cuarto de galón
ppg	Unidad de libras por galón en inglés
s	Unidad de segundos
HP/HT	Alta presión y alta temperatura
cp	Unidad de centiPoise
g	Unidad de gramos
ROP	Tasa de penetración

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el desempeño de una arcilla organofílica en dos tipos de lodo base aceite (OBM) modificando una arcilla bentonítica con dos tipos de amonios cuaternarios, puesto que las arcillas de tipo montmorillonítico, originalmente hidrofílicas cuando se tratan con sales de amonio cuaternario se transforman en organofílicas, lo cual les permite producir fenómenos tixotrópicos, viscosos y gelificantes en diferentes campos de la industria. La arcilla organofílica se sintetizó por un método en el cual se hace una dispersión de agua desionizada junto a la bentonita y posteriormente se le añade el amonio cuaternario (Cloruro de benzalconio, Amonio cuaternario de quinta generación) lo que permite un intercambio iónico. Luego la solución bentonítica se lavó con el fin de no tener presencia de cloruros, el intercambio iónico se llevó a cabo para las dos soluciones, la primera con el cloruro de benzalconio y la segunda con el amonio cuaternario de quinta generación durante dos días en un horno que no excedió la temperatura de 60° C, consecuentemente el producto fue secado, tamizado en malla 100 y se repitió cinco veces con el fin de tener un porcentaje de error mínimo. Teniendo en cuenta esto la empresa Qmax proporcionó la formulación de un lodo base aceite usado por una operadora en Colombia con una relación volumétrica 80:20 en donde la fase continua es el aceite (Diesel) y la discontinua el agua, además de los aditivos. Este lodo base fue la referencia para el análisis experimental y financiero de los lodos modificados, se evaluaron propiedades físicas y químicas por medio de pruebas en laboratorio regidas bajo la norma API 13B-2 y pruebas especiales como el filtrado high pressure high temperature (HPHT), lubricidad y estabilidad eléctrica, con la ayuda de Qmax se realizaron las pruebas especiales debido a que la universidad no cuenta con algunos de estos equipos y fue necesario ver el comportamiento de los lodos a condiciones extremas de temperatura y presión como frecuentemente sucede en pozos de gas, no convencionales, o costa afuera en aguas profundas y ultra profundas con el fin de analizar y estudiar el caso en cuestión.

Palabras clave: Fluido Perforación, Emulsión Inversa, Arcilla organofílica, Lodo base aceite, aminas cuaternarias, Fase dispersa, Fase Continua.

INTRODUCCIÓN

Los lodos base aceite son fluidos de perforación en los cuales el agua ha sido cambiada total o parcialmente por aceite (gasoil, mineral, vegetal o sintético) como principal fase continua. [1] Estos fluidos se utilizan cuando se presentan problemas al perforar con fluidos base agua, por ejemplo, a temperaturas muy elevadas, en perforaciones de arenas productoras sensibles al agua en pozos desarrollados, perforación en medios corrosivos, extracción de núcleos y alivio del pegado de la tubería por presión diferencial [2]

Para este proyecto investigativo se pretende evaluar un fluido de perforación de emulsión inversa (agua en aceite), que ocurre cuando se presenta al agua como la fase dispersa, y al aceite (biodiesel), como una fase continua. Existen valores muy superiores al 40% en donde el agua contenida se puede dispersar y ser emulsificada en el aceite. Presentan gran estabilidad cuando son expuestos a altas temperaturas, además de que las contaminaciones químicas que se presentan no tienen repercusión en esta emulsión. Cabe hacer énfasis que la emulsión inversa, puede ser ajustada a la relación aceite-agua.[3]

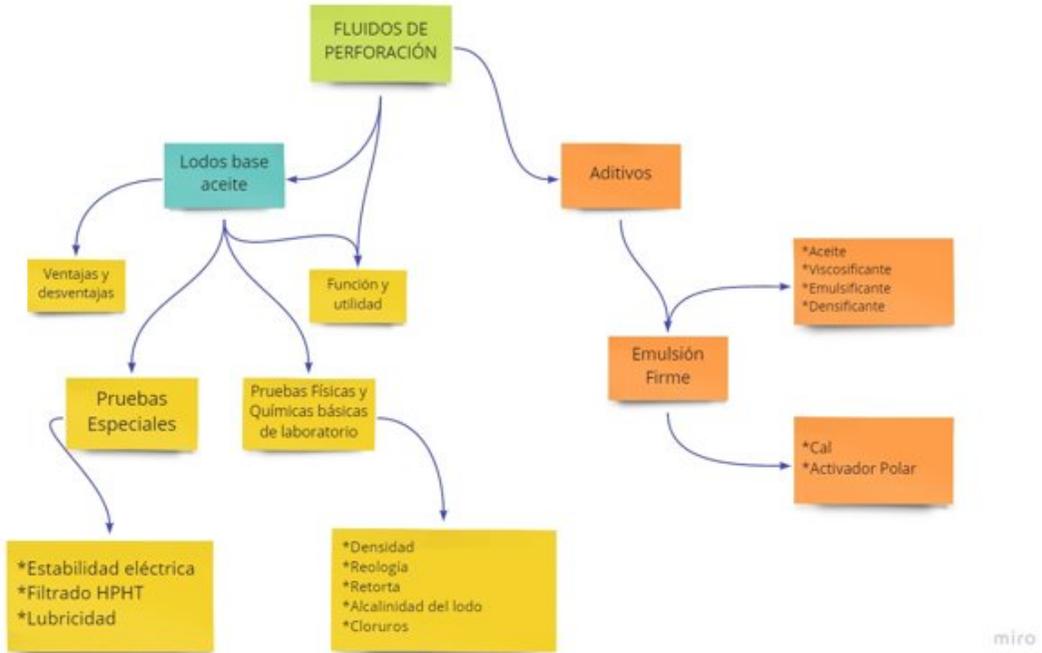
Se planea utilizar Amonio cuaternario de quinta generación para sintetizar la arcilla organofílica del primer lodo, y para un segundo lodo se utilizará cloruro de benzalconio con el fin de comparar algunas propiedades fisicoquímicas frente al lodo base proporcionado por la empresa Qmax para asimismo definir si las propiedades tixotrópicas, reológicas y viscosificantes del fluido de perforación aumentan su eficiencia y generan una estabilidad en nuestros lodos, además se busca mejorar la resistencia térmica con el fin de que la arcilla organofílica no se desintegre a altas temperaturas y que su utilidad sea más amplia, como por ejemplo en yacimientos no convencionales.

La arcilla organofílica es capaz de desarrollar dichas propiedades, asimismo permite obtener buenos geles en el sistema base aceite mediante un intercambio catiónico, es hidrofílica, reacciona con sales de amina en este caso se modificará con una amina cuaternaria de quinta generación y con cloruro de benzalconio; además se requiere la ayuda de un activador polar que será el metanol con el fin de lograr un mayor rendimiento del fluido propuesto.[4]

1. MARCO TEORICO

Figura 1.

Esquema de los temas y subtemas a tratar en el marco teórico.



Nota. Representación simplificada de los temas y subtemas del marco teórico.

En esta sección se presentarán los aspectos generales de los lodos base aceite, ventajas y desventajas en la perforación de pozos, así mismo la importancia que tienen los diferentes tipos de aditivos y aminas presentes en el lodo; con un enfoque a la utilidad y sintetización de la arcilla organofílica en los OBM, también se presenta de manera universal los diferentes equipos en donde se realizan las pruebas de laboratorio especiales con la finalidad de demostrar las funciones y el beneficio que tiene para la industria de los hidrocarburos mejorar continuamente los fluidos de perforación tanto para pozos HPHT, pozos productores de gas, y pozos no convencionales teniendo en cuenta los factores económicos y técnicos para el proyecto.

1.1 Fluidos de perforación

El fluido de perforación es un líquido o gas que circula a través de la sarta de perforación hasta la broca y regresa a la superficie por el espacio anular. Es una parte clave del proceso de perforación,

y el éxito de la operación radica en un diseño óptimo y confiable, el fluido de perforación se diseña para un área particular que cumpla con los requerimientos específicos dependiendo de la formación por donde va a circular el fluido. Existen funciones relevantes del fluido de perforación tales como:

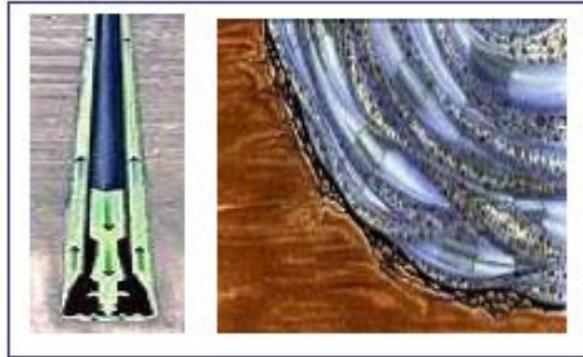
- Control de presiones en fondo de pozo
- Generar lubricidad y enfriamiento a la sarta de perforación
- Remover recortes de fondo a superficie para evitar pegas de tuberías y daños operacionales
- Recubrir el hoyo con un revoque de pared de baja permeabilidad
- Soportar parte del peso del revestimiento y la sarta de perforación
- Sostener los recortes y el material pesado (sedimentos. Minerales) en suspensión cuando se detenga la circulación
- Prevenir al máximo cualquier daño a formaciones aledañas
- Transmitir potencia hidráulica a la broca
- Controlar la corrosión en equipos y herramientas dentro del pozo [5]

1.1.1 Función y utilidad de los fluidos de perforación

a) Transportar los ripios de perforación, derrumbes o cortes desde el fondo del hoyo hasta la superficie: Los ripios de perforación deben ser retirados conforme se van perforando los estratos; para lograrlo, el fluido de perforación se circula dentro de la columna de perforación y con la ayuda de la barrena se transportan los recortes hasta la superficie subiendo por el espacio anular. La remoción de los ripios depende del tamaño, la forma, la densidad de los recortes, la velocidad de penetración, rotación de la columna de perforación y la viscosidad, siendo así la característica más importante la velocidad anular del fluido de perforación, el cual depende de la tasa de inyección y el caudal, para esto es de vital importancia el bombeo del fluido con un volumen y una presión adecuada logrando que el fondo de pozo permanezca limpio y en óptimas condiciones.[6]

Figura 2.

Representación del transporte de ripios, cortes y derrumbes de fondo a superficie



Nota. La figura representa como el fluido de perforación transporta (ripios, recortes, derrumbes) por medio del espacio anular hacia superficie. Tomado de: <https://tinyurl.com/a6g6vbfu>. M. Hernández, «slideshare,» 24 03 2017. [En línea]. [Último acceso: 20 02, 2020].

- b) Mantener en suspensión los ripios y material densificante cuando se detiene la circulación: El fluido de perforación debe tener la capacidad de suspender los recortes de perforación y el material densificante cuando la fuerza de elevación por flujo ascendente es eliminada y estos por fuerzas gravitatorias caen al fondo y detienen la circulación. A esta propiedad se le llama tixotropía la cual permite al fluido de perforación mantener en suspensión esas partículas remanentes de los ripios; así mismo bajo condiciones estáticas la fuerza de gelatinización debe evitar que el material densificante se precipite en los fluidos más pesados.[6]

Figura 3.

Suspensión de los ripios y material densificante cuando se detiene la circulación.



Nota. La figura representa la suspensión de los ripios y material densificante cuando se detiene la circulación en un pozo. Tomado de: <https://tinyurl.com/a6g6vbfu>. M. Hernández, «slidshare,» 24 03 2017. [En línea]. [Último acceso: 20 02, 2020].

- c) Limpiar, enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación: A medida que se van perforando estratos por medio de la sarta de perforación y la broca se produce fricción y energía en forma de calor. Los fluidos de perforación brindan lubricación y enfriamiento mediante conductividad térmica y capacidad calorífica, para que el calor se remueva del fondo del pozo transportando así la energía y disipándola a la atmosfera para permitir el continuo proceso de rotación y pueda aumentar la vida útil de la broca. La lubricación puede ser especial en pozos horizontales o multilaterales que son de área mucho mayor a los verticales, la lubricación también puede aumentarse agregando emulsificantes o aditivos especiales al fluido de perforación que pueda afectar directamente la tensión superficial.
- d) Controlar las presiones en la formación: El fluido de perforación se prepara especialmente con el fin de controlar la presión en fondo de pozo es decir, la presión natural de las formaciones, se debe alcanzar un equilibrio en donde el fluido de perforación tenga la capacidad de alcanzar un equilibrio en el que la presión ejercida por el fluido de perforación (presión hidrostática) contra los estratos sea suficiente para controlar y contrarrestar las presiones ejercidas por los fluidos como el agua, el petróleo y el gas, pero se debe tener en cuenta que la presión ejercida por el fluido de perforación no sea demasiada para que llegue a causar un daño en la formación y se filtre el fluido por la fractura.

- e) Prevenir derrumbes de la formación: La estabilidad del pozo depende del equilibrio entre los factores de presión, esfuerzos causados por la formación y factores químicos. Propiedades tanto físicas como químicas son importantes para que un fluido de perforación tenga un buen rendimiento y funcione en óptimas condiciones. Independientemente de la composición química del fluido, el peso debe estar en un rango donde genere el equilibrio de las fuerzas mecánicas y químicas que actúan sobre el pozo.
- f) Suministrar un revoque liso, delgado e impermeable para proteger la productividad en la formación: Revoque es un recubrimiento impermeable que se forma en la pared del hoyo debido al proceso que este se somete como es la filtración, la cual ocurre bajo condiciones dinámicas y estáticas, bajo condiciones dinámicas ocurre cuando el fluido de perforación está circulando y en condiciones estáticas durante viajes de tuberías, conexiones o cuando el fluido no se mueve.
- g) Transmitir la potencia hidráulica a la formación por debajo de la broca: Durante la circulación, el fluido de perforación es expulsado a través de las boquillas de la broca a gran velocidad. La energía hidráulica que este genera, permite que la broca este lubricada y limpia de recortes para maximizar la ROP.[6]

1.2 Lodos base aceite

El lodo base aceite se refiere a lodos preparados en aceite con un porcentaje en volumen de agua entre el 1 y 5%, mientras que un lodo de emulsión inversa se prepara con 5 a 50% de volumen de agua y este se puede emulsificar y dispersar en el aceite, estos fluidos son estables a altas temperaturas, inertes a la contaminación química y pueden ser densificados después de ser ajustada la relación aceite-agua. [7]

1.2.1 Utilidad de los lodos base aceite

Los lodos base aceite son altamente tolerantes a los contaminantes debido a la baja interacción entre la formación y el aceite. Se pueden incorporar grandes cantidades de sólidos perforados al sistema sin directamente afectar las propiedades tanto físicas como químicas del fluido. Este tipo de lodos ofrece una lubricidad mucho mayor que uno base agua reduciendo así mismo el torque y arrastre, evitando al máximo la abrasión y al mismo tiempo que sus productos son más estables térmicamente.

Las propiedades se ven afectadas directamente por los siguientes parámetros:

- Temperatura y presión en fondo de pozo
- Relación aceite/agua
- Tipo y concentración del emulsificante
- Contenido de sólidos

Por consiguiente, los sistemas de lodo base aceite se clasifican de acuerdo a cuatro categorías como son explicados brevemente en la siguiente tabla. [8]

Tabla 1.

Sistema de lodos base aceite en la industria.

Sistema	Aplicación
Emulsión firme	Para uso general y en áreas de altas temperaturas de hasta 500°F (260°C)
Filtrado relajado (FR)	Para proveer altos índices de perforación
Aceite 100%	Para uso como fluido no perjudicial de extracción de núcleos y perforación
Alto contenido de agua	Para reducir la retención de aceite en los recortes; usando principalmente en zonas costa afuera que son ambientalmente sensibles.

Nota. Esta tabla representa el sistema y la aplicación que tienen los diferentes lodos base aceite aplicados a la industria de los hidrocarburos. Manual de fluidos de perforación Baroid. <https://tinyurl.com/4loggbld> Manual de fluidos baroid, baroid the complete fluids company., Houston Texas, EE. UU., 2000

- Sistemas de emulsión firme: Los sistemas de emulsión firme INVERMUL y ENVIROMUL ofrecen estabilidad a alta temperatura y tolerancia a los contaminantes. Estos sistemas usan altas concentraciones de emulsionantes y agentes de pérdida de fluido para máxima estabilidad de la emulsión y mínima pérdida de filtrado. El volumen del filtrado HPHT (high pressure, high temperature) es comúnmente menor de 15mL y debe ser todo aceite; el fluido base de un sistema INVERMUL es el diésel; el fluido base de un sistema ENVIROMUL es un aceite mineral. [8]
- Sistema de filtrado relajado (FR): Los sistemas de filtrado relajado INVERMUL RF y ENVIROMUL RF tienen bajas o nulas concentraciones de emulsionante INVERMUL y agente de control de filtración DURATONE HT. El aumento de filtrado en estos sistemas propende a más rápidas velocidades de perforación de los que son posibles con sistemas de emulsión firme. El volumen de la pérdida de fluido HPHT es de 15 a 20 cm con optimizada pérdida instantánea; Estos sistemas son estables a temperaturas de hasta 325°F (163°C). el fluido base de un sistema

INVERMUL RF es el diésel; el fluido base de un sistema ENVIROMUL RF es un aceite mineral.[8]

- c) Sistema de perforación/ extracción de núcleos 100% aceite: Sistema 100% aceite, se usa cuando el mantenimiento del estado nativo de la formación geológica constituye un factor primordial. Este sistema no se usa donde la contaminación del agua es un problema conocido en la zona; el fluido base para este sistema de lodo puede ser diésel o aceite mineral.[8]
- d) Sistema de perforación 100% aceite: Sistema 100% aceite, es utilizado cuando se anticipa que la temperatura de circulación de fondo y la temperatura de fondo estarán en el rango de 350 a 425°F (177 - 218°C). Este sistema tolera la contaminación con agua a alta temperatura con un efecto mínimo en las propiedades. Utiliza tanto un emulsificante primario como uno secundario que le da al sistema una mayor tolerancia a la contaminación con agua y la capacidad de conseguir pesos mayores. [8]

1.3 Ventajas y desventajas OBM

Los lodos base aceite son fluidos de perforación que su fase externa es el aceite, este es un lodo de emulsión inversa en el cual su fase interna es el agua y su fase externa el aceite, por ende, este tipo de lodos tiene sus limitaciones y sus ventajas las cuales son las siguientes:

1.3.1 Ventajas

- a) Resistente a temperaturas muy elevadas.
- b) Eficiente para perforaciones en formaciones lutíticas debido a que no reacciona con las arcillas de la formación causando inestabilidad en el fluido y el pozo.
- c) Funciona como buen lubricante para la barrena siendo así operativamente mejor que uno base agua.
- d) Se crean delgados revoques, lo que reduce el riesgo de pega de tubería.
- e) Puede ser tratado y reusado, así como ser empleado para largas corridas pudiendo con ello reducir costos totales debidos a fluidos de perforación.
- f) Es excelente para usarse en áreas donde existen problemas de hidratos como en perforaciones en aguas profundas.
- g) Cuando se perfora con lodo base aceite se puede fácilmente conservar el calibre del hoyo [9]

1.3.2 Desventajas

- a) Es complejo mantener el taladro limpio durante la perforación.
- b) Los costos de un sistema base aceite en comparación a un sistema base agua son más elevados.
- c) Es considerado como residuo peligroso por ende la disposición no se puede realizar directamente al ambiente. [9]
- d) La detección de una arremetida se reduce cuando se utilizan lodos base aceite en comparación con los lodos base agua debido a la alta solubilidad del gas en los OBM.
- e) Los OBM son costosos cuando se producen pérdidas de circulación.
- f) Cuando se utilizan lodos base aceite la regulación medioambiental es muy estricta como para el manejo de recortes.
- g) El registro eléctrico debe modificarse para su uso en lodos base aceite. En razón de que los lodos base aceite no son conductores, por lo cual los registros de resistividad, y registros de potencial espontáneo (SP) se le debe hacer un ajuste.
- h) Los lodos base aceite requieren emulsionantes que son materiales que humedecen el aceite, lo que puede tener contraindicaciones en la humectabilidad de la roca.
- i) Los lodos base aceite son más compresibles que los lodos a base agua y, por lo tanto, la densidad en fondo de pozo puede variar considerablemente a la medida en superficie.[10]

1.4 Aditivos

La formulación que va a llevar a cabo el proyecto investigativo se compone de diferentes aditivos para generar una buena emulsión, consta de un lodo base aceite biodiésel de emulsión inversa preparada en una proporción volumétrica de 80:20, donde el biodiésel será la fase continua y el agua la dispersa, La arcilla organofílica tiene como función principal ser una propiedad viscosificante además de proveer tixotropía y reología al lodo, mejora la capacidad de acarreo y limpieza en fondo, La barita (sulfato de bario) es un sólido que se le aplica a los OBM con el fin de incrementar la densidad y de evitar al máximo que el gas, agua o aceite invadan las formaciones de alta permeabilidad en el hoyo, permitiendo así una estabilidad en el pozo mediante el control de la presión hidrostática de las columnas del fluido, el emulsificante facilita y estabiliza la emulsión, la salmuera $CaCl_2$ constituye la fase dispersa y proporciona la estabilidad osmótica del pozo durante zonas de perforación lutíticas dado que estas son sensibles al agua, los agentes de filtrado mejoran el control de filtrado en formaciones muy permeables y debe mantenerse lo más

bajo posible para que la estabilidad del pozo sea mayor y así mismo evitar derrumbes y daños a la formación; En la siguiente tabla se clasifican los aditivos de un lodo de perforación base aceite (emulsión inversa)

Tabla 2.

Aditivos de un lodo de emulsión inversa.

Clasificación de los aditivos según sus funciones	Definición	Aditivo	Función
Aceite	Fase a la cual se mejorará sus propiedades para ser utilizado como fluido de perforación	Aceites Minerales	Obtener bajas viscosidades y altas tasas de penetración
Viscosificantes	Aumentar viscosidad de los fluidos y ayuda a la suspensión de recortes de formación	Arcilla Organofílica (Geltone II)	Aporta viscosidad y propiedades de suspensión.
Emulsificantes	Permite la mezcla heterogénea, básicamente permanente, de dos líquidos que no se disuelven el uno en el otro	Ácido graso refinado de tall oil (EZ-CORE)	Utilizado como emulsificante en lodo 1005 aceite para extracción de núcleos.
Densificantes	Controlar presión y prevenir reventones	Barita	Agrega peso al fluido de perforación

Tabla 2. Continuación

Densificantes	Controlar presión y prevenir reventones	Barita	Agrega peso al fluido de perforación
Cal	Es un cristal incoloro o polvo blanco, obtenido mediante la reacción oxido de calcio y agua. Puede también precipitarse mezclando una solución de cloruro de calcio con una de hidróxido de sodio.	Cal hidratada	Hacer más efectiva la acción del emulsificante y actúa como secuestrador de gases agrios (H_2S y CO_2)
Material para pérdida de circulación	Controlar pérdida de circulación	Leonardita Organofílica (Duratone HT)	Controlar la velocidad de filtración de lodos de perforación.
Activador polar	Aumenta el rendimiento de la arcilla organofílica	Metanol	Mejora la eficiencia y mantiene la estabilidad de la arcilla

Nota: esta tabla representa los diferentes aditivos para un lodo de emulsión inversa con sus respectivas funciones. Evaluación de arcilla organofílica gastada como aditivo reológico de los lodos base aceite. Tomado de <https://tinyurl.com/5uvaffik> D. G. Mendez Cevallos. *evaluación de arcilla organofílica gastada como aditivo reológico de lodo base aceite. Tesis pre.* facultad de ingeniería en geología y petróleo. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador 2018.

1.5 Arcilla organofílica

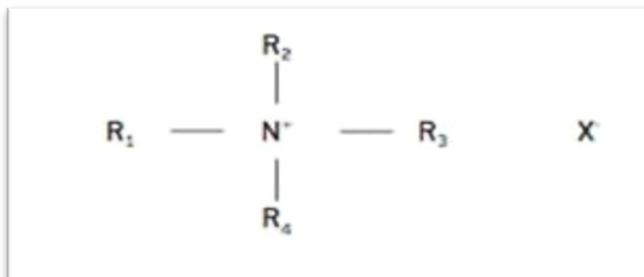
«Las arcillas organofílicas se fabrican haciendo reaccionar aminas cuaternarias con bentonita (o hectorita) mediante el proceso de mezcla en seco o el proceso de suspensión húmeda. El proceso de mezcla en seco implica la mezcla por cizallamiento de las aminas cuaternarias con bentonita sin adición de agua. Este proceso da como resultado superficies tratadas de manera desigual en las placas de la arcilla, pero produce una arcilla organofílica eficaz a un costo de fabricación relativamente bajo. El proceso de suspensión húmeda, por otro lado, da como resultado un producto de mayor pureza y un tratamiento más uniforme, pero a un costo relativo más alto. La bentonita se dispersa primero en agua y los compuestos inertes como el cuarzo y el feldespato se eliminan mediante procesos de sedimentación gravitacional. La amina cuaternaria se añade a la suspensión de arcilla purificada y un producto de reacción de arcilla organofílica precipitada se filtra, se lava para eliminar el cloruro de sodio producido, se seca y se muele.» [11]

1.6 Amonios Cuaternarios

Los amonios cuaternarios son compuestos químicos clasificados dentro del grupo de los tensoactivos catiónicos. Su estructura general comprende una porción catiónica compuesta por un átomo de nitrógeno unido a cuatro cadenas alquílicas (parte funcional de la molécula) y un átomo halógeno (generalmente cloro) [12], son una familia de compuestos antimicrobianos, que poseen acción bactericida, fungicida y viricida. Tienen estructura básica del ion amonio (NH_4) que cuando se modifica da lugar a diferentes generaciones, existen diferentes tipos de amonios cuaternarios dependiendo de sus cadenas alquílicas de carbono, también se diferencian por su grado de biodegradación y eficiencia.

Figura 4.

Estructura química de los amonios cuaternarios.



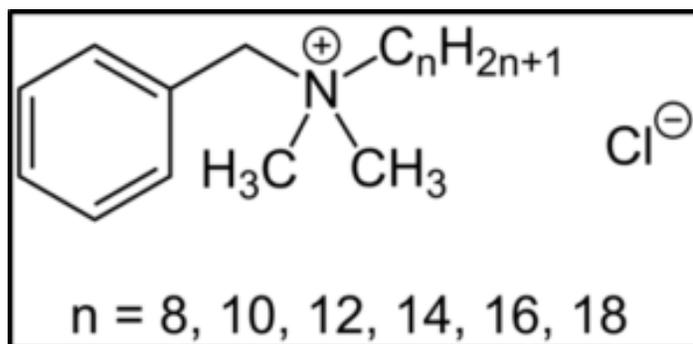
Nota. La figura representa la estructura química general de los amonios cuaternarios. Tomado de: <https://tinyurl.com/679k3uju>. P. S.A., «Proquimia,» 01 04 2020. [En línea]. [Último acceso: 15 03 2021].

1.6.1 Cloruro de benzalconio

El cloruro de benzalconio fue el primer amonio introducido en el mercado. Las cadenas alquílicas de 12 y 14 carbonos, son los que presentan mayor poder antibacterial, es una sal de amonio cuaternario comercializada como mezcla de CADA, con pesos moleculares variables dependiendo de la longitud de los grupos alquílicos. [13]

Figura 5.

Representación de las cadenas alquílicas del benzalconio.



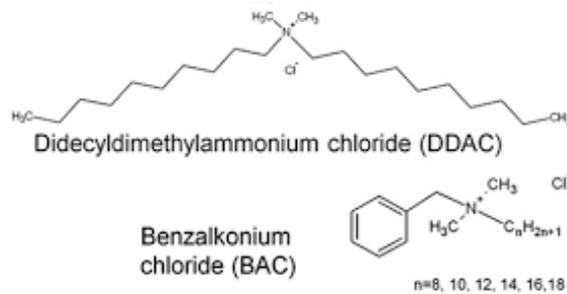
Nota. La figura representa las cadenas alquílicas de carbono del cloruro de benzalconio. Tomado de: <https://tinyurl.com/679k3uju>. P. S.A., «Proquimia,» 01 04 2020. [En línea]. [Último acceso: 15 03 2021].

1.6.2 Amonio cuaternario de quinta generación

La 5ta generación resulta de la mezcla de amonios cuaternarios de cuarta generación con otros compuestos complementarios. Esta nueva generación de amonios cuaternarios, con respecto a generaciones anteriores, son superiores en su eficiencia germicida, baja generación de espuma, y su alta tolerancia en cargas proteicas y aguas duras. El DDAC, ni sus componentes complementarios contienen anillos aromáticos (derivados del benceno), por lo que representan compuestos más nobles con el medio ambiente (biodegradables) y de baja toxicidad para el ser humano. [13]

Figura 6.

Cadena dialquílica lineal del DDAC.



Nota. En la figura está representada la cadena gemela, cadenas dialquílicas lineales y sin anillo bencénico. Tomado de: <https://tinyurl.com/679k3uju>. P. S.A., «Proquimia,» 01 04 2020. [En línea]. [Último acceso: 15 03 2021].

1.7 Pruebas físicas básicas de laboratorio

1.7.1 Densidad o peso

La densidad es la propiedad del lodo cuya principal función es mantener la presión hidrostática levemente mayor a la presión de la formación, esto con el fin de controlar los esfuerzos del subsuelo y así evitar influjos a la tubería. A esto se le conoce como perforación sobre balance. [14]

Esta prueba se realiza con una balanza de lodos la cual da el resultado en ppg, antes de realizar la medición se debe calibrar con agua destilada, esta debe dar un valor de 8,33 ppg con un margen de error de 0,1 ppg [15]

1.7.2 Reología

Estas pruebas son realizadas de manera directa e indirectas (mediante ecuaciones) con el viscosímetro de lectura directa, <<este aparato está constituido por un rotor que gira dentro de una taza mediante un motor eléctrico. Una caja de velocidades, que actúa mediante un sistema de engranaje, hace girar el rotor a diferentes velocidades. Al girar el rotor se produce un cierto arrastre. Este arrastre se mide mediante una balanza de torsión, que indica la fuerza desarrollada en un dial graduado.>> [16]

1.7.2.a. Viscosidad embudo. Esta prueba se realiza con un embudo Marsh, el embudo se utiliza para determinar la viscosidad del fluido en segundos por cuarto de galón.

1.7.2.b. Viscosidad plástica. Esta prueba constituye una buena aproximación de la viscosidad dinámica de un lodo a través de las boquillas de la broca.

$$PV = \theta_{600} - \theta_{300}$$

Donde:

PV: Viscosidad plástica del lodo [cP].

θ_{600} : Lectura @ 600 RPM.

θ_{300} : Lectura @ 300 RPM.

1.7.2.c. Viscosidad aparente. Conocida también como AV, es la viscosidad de un lodo de perforación a una determinada velocidad de corte y temperatura fija, se puede obtener matemáticamente a partir de la siguiente ecuación:

$$AV = \frac{\theta_{600}}{2}$$

Donde:

AV: Viscosidad aparente del lodo [cP].

θ_{600} : Lectura @ 600 RPM.

1.7.2.d. Punto cedente. <<Es la resistencia de un fluido a desplazarse, ocasionada por las fuerzas de atracción entre los sólidos, producto de la interacción de las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas dispersas, la cantidad de sólidos y la concentración iónica de las sales contenidas en la fase fluida del lodo.>> [17]

También conocido como Yield point, se puede expresar matemáticamente, mediante la siguiente expresión:

$$YP = \theta_{300} - PV$$

Donde:

YP: Punto cedente del lodo $\left[\frac{lb}{100ft^2} \right]$

θ_{600} : Lectura @ 300 RPM.

PV: Viscosidad plástica del lodo.

1.7.2.d. Resistencia gel Esta fuerza de geles es uno de los parámetros fundamentales del fluido de perforación debido a que nos muestra la capacidad de un lodo de suspender los ripios y todo el material relativamente pesado cuando la circulación es detenida.

El esfuerzo se mide según API en periodos de 10 segundos y 10 minutos (se reporta en $\frac{lb}{100ft^2}$), y mide la fuerza de ruptura o resistencia de la consistencia del gel formado después de los tiempos de reposo indicados anteriormente [17]

1.7.3 Porcentaje de líquidos y sólidos

Esta prueba es importante debido a que provee información fundamental para el control de las propiedades del lodo y es esencial en la evaluación del equipo de control de sólidos.

El porcentaje de líquidos y sólidos es determinado mediante una prueba de retorta. Los resultados obtenidos permiten conocer a través de un análisis de sólidos, el contenido de partículas de alta y baja gravedad específica.

Los sólidos presentes en el lodo son:

- Sólidos suspendidos: Partículas dispersas que pueden determinarse mediante la retorta.
- Sólidos disueltos: Componentes solubles en una muestra. Reportados en [ppm] o $\left[\frac{mg}{L} \right]$; estos sólidos pueden calcularse a partir de análisis químicos asumiendo que todos son $NaCl$ y $CaCl_2$ [16]

1.7.4 Contenido de arenas

Es el porcentaje de partículas sólidas más grandes que 74μ (malla de mesh 200) en un fluido de perforación. Es importante su remoción del lodo debido a que es muy abrasivo. [15]

La arena es un sólido no reactivo indeseable de baja gravedad específica. El porcentaje de arena durante la perforación de un pozo debe mantenerse en el mínimo posible para evitar daños a los equipos de perforación. La arena es completamente abrasiva y causa daño considerable a las camisas de las bombas de lodo. [16]

1.7.5 Potencial de hidrógeno

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno H^+ [13]

El objetivo principal de realizar esta prueba está en la valoración del grado de acidez o basicidad del lodo para evitar problemas de corrosión y contaminación [18]

1.8 Pruebas químicas básicas de laboratorio

1.8.1 Alcalinidad del lodo

Permite medir la concentración total de iones $[OH^-]$ presentes en el fluido de perforación (fase líquida y sólida), también el exceso de cal libre. Denota como P_m y es determinada con fenolftaleína como indicador.

La alcalinidad del lodo influye notablemente en el comportamiento de las arcillas. A bajos valores de pH, los bordes rotos de las partículas arcillosas tienen más cargas positivas que negativas, lo contrario sucede cuando los valores de pH son altos. Por ello es importante mantener un Ph por encima de 7, con esto se asegura que este tipo de sólidos se encuentren cargados negativamente. De esta manera, es mantenida la interacción electrostática a un mínimo. Un pH menor a 7, va incrementar la asociación cara-borde. [17]

1.8.2 Alcalinidad del filtrado

Son los centímetros cúbicos cm^3 de ácido sulfúrico $[H_2SO_4]$ a 0,02N requeridos por centímetro cubico de filtrado para llevar el pH del lodo a 8,3. Expresada como P_f . Es precisada utilizando como titulador la fenolftaleína. [17]

1.8.3 Cloruros

Esta prueba consiste en medir el volumen de una solución estandarizada de nitrato de plata $[AgNO_3]$ requerido para reaccionar con este tipo de iones y formar un cloruro de plata insoluble.

Los objetivos fundamentales de esta prueba son los siguientes:

- Precisar el valor de salinidad de la fase acuosa en el filtrado.
- Ajustar los valores obtenidos en el ensayo de retorta y calcular una concentración corregida de sólidos. [17]

1.9 Pruebas especiales OBM

1.9.1 Estabilidad eléctrica

Esta medida es importante para determinar la estabilidad de la emulsión inversa. Para que un lodo base aceite sea considerado estable, el valor de esta prueba debe ser mayor de 700V, de no ser así se debe adicionar más agente tensoactivo. Para el caso de este proyecto se realizaron 3 mediciones de cada muestra y el valor reportado fue el promedio aritmético de estos a 120°F

1.9.2 Lubricidad

Es la disminución de la resistencia a la fricción de la sarta a la rotación y al movimiento vertical del pozo (torque y arrastre), incrementando la vida útil de la broca y la sarta. La fricción puede suceder entre la sarta y el revestimiento o las paredes del hueco. [19]

A 60 RPM y 150 in-lb de torque, la lectura del agua destilada debe ser de 34. Sin embargo, se requiere un factor de corrección para alcanzar resultados exactos, para calcular este factor se divide la medición estándar para el agua de 34 por la lectura realizada por el medidor, en este caso 32,1

$$\text{Factor de corrección} = \frac{\text{Lectura estandar del agua}}{\text{Lectura realizada del agua}} = \frac{34}{32,1} = 1,059$$

Ya con este factor el procedimiento es simplemente multiplicarlo por la siguiente relación:

$$\text{Coeficiente de lubricidad del lodo} = \frac{\text{Lectura realizada del lodo}}{100} * 1,059$$

1.9.3 Filtrado HPHT

La prueba consiste en determinar la velocidad a la cual se fuerza un fluido a través de un papel filtro bajo ciertas condiciones de tiempo, temperatura y presión especificadas en la norma API RP 13B, La prueba de filtrado HT-HP es realizada a una temperatura de 250 °C (482 °F) y a una presión diferencial de 500 psi (3449 KPa), y los resultados se registran como el doble del número

de mililitros perdidos en 30 minutos. [20] En esta prueba las mediciones se hicieron a una temperatura

de 250°C (482°F) y una presión diferencial de 600psi soportada con un tanque de hidrogeno. Para las tres mediciones el lodo convencional, el lodo con ACQG y posteriormente el lodo con CDB.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

2.1 Síntesis de la arcilla organofílica con amonio cuaternario de quinta generación.

Para realizar la síntesis de arcilla organofílica, se contó con una solución de 1 litro de amonio cuaternario de quinta generación, en una concentración de 5000 ppm, de la cual se usó 500 mL.

Luego se procede con la solución bentonítica, la cual tenía una relación de 100 gramos de arcilla por cada litro de agua, se preparó en total 500 mL de esta solución (50 gramos de bentonita en 500 mL de agua). Se dejó mezclando durante 5 minutos.

Una vez realizado el procedimiento anterior las dos soluciones fueron disueltas durante 2 horas a 400 RPM, pasado este tiempo se lavó con abundante agua desionizada hasta fin de cloruros, esto último se verificó constantemente mientras se realizaba el lavado mediante titulaciones con nitrato de plata y cromato de potasio como indicador.

Figura 7.

Titulación de la solución bentonítica.

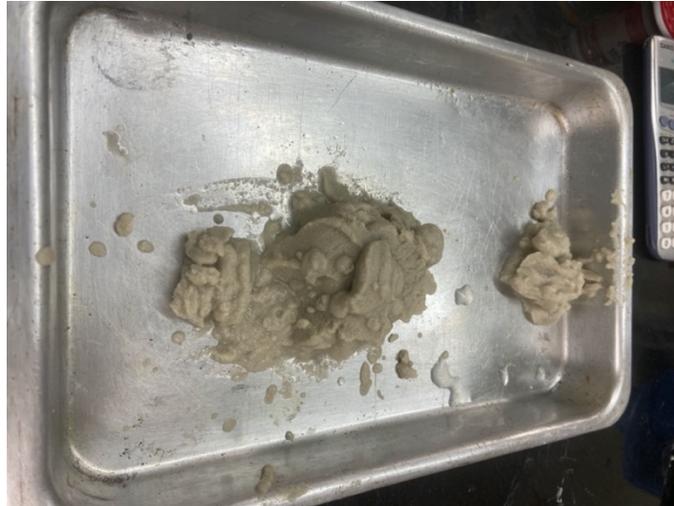


Nota. Solución bentonítica corroborando que no haya presencia de cloruros.

El resultado de este proceso fue una masa gris con alta humedad, para retirar la cantidad sobrante de agua se dejó secar en un horno durante 48 horas a una temperatura constante de 70° Celsius, pasado el tiempo de secado se molió con un mortero.

Figura 8.

Masa antes del secado.



Nota. En la foto se ve el resultado del lavado, se evidencia aún un alto contenido de humedad.

Figura 9.

Arcilla sin moler.

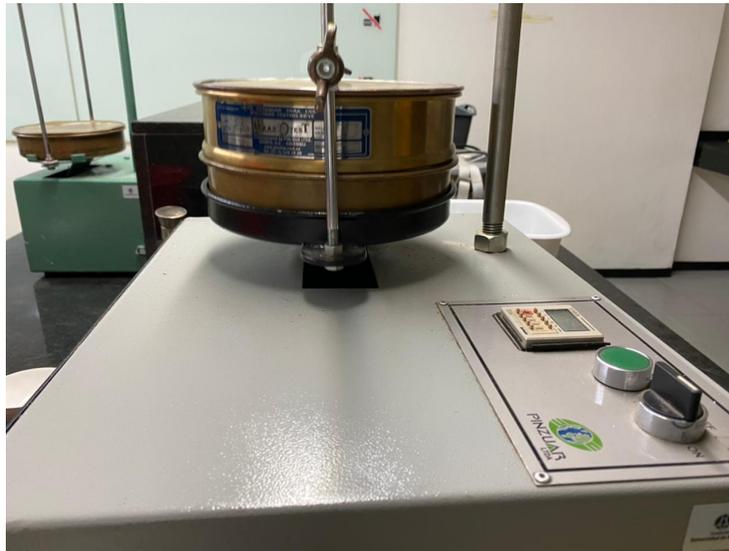


Nota. En la foto se nota la arcilla después de haber retirado toda la humedad.

Después se maceró con morteros hasta obtener un fino polvo. Como el tamaño de partícula debía ser máximo de 149 micras, se tamizó con malla N° 100 durante 5 minutos.

Figura 10.

Tamizadora.



Nota. Proceso del tamizado con malla 100.

Finalmente, pasados los 5 minutos en el tamiz dio como resultado la arcilla organofílica sintetizada con amonio cuaternario de quinta generación con una coloración blanca e inolora.

Figura 11.

Arcilla organofílica sintetizada.



Nota. Sintetización de la arcilla luego del secado y el tamizado en malla 100.

2.2 Síntesis de la arcilla organofílica con cloruro de Benzalconio

A diferencia con el caso del ACQG, se contó inicialmente con una solución muy concentrada de cloruro de benzalconio (500.000 ppm), por lo que se procedió a realizar la dilución de la siguiente manera:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde:

C_1 : Concentración inicial

V_1 : Volumen inicial

C_2 : Concentración final

V_2 : Volumen final

Teniendo eso claro, se despejó el volumen inicial que se requería para realizar la dilución y preparar 500 mililitros a 5000 ppm

$$V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1}$$

Reemplazando.

$$V_1 = \frac{5000 \text{ ppm} * 500 \text{ mL}}{500.000 \text{ ppm}} = 5 \text{ mL}$$

Se continuó preparando la solución bentonítica y la posterior mezcla con la disolución de cloruro de benzalconio, luego se le realizaron los mismos pasos que al ACQG.

En este caso también el resultado fue la arcilla organofílica modificada.

2.3 Cuantificación del material

Debido a que el alcance de este proyecto es solo a escala laboratorio, se procedió a realizar una equivalencia entre las unidades de campo y unidades cómodas para trabajar experimentalmente, dando como resultado a las siguientes relaciones.

1 bbl de líquido (en campo) = 350 mL de líquido (en laboratorio)

1 lb de sólido (en campo) = 1 g de sólido (en laboratorio)

1 gal de líquido (en campo) = 8,34 mL de líquido (en laboratorio)

De acuerdo al siguiente factor de conversión:

$$\frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ bbl}} \times \frac{454 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ bbl}}{42 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ gal}}{3785 \text{ mL}} = \frac{1 \text{ g}}{350 \text{ mL}}$$

$$1 \text{ gal} \times \frac{350 \text{ mL}}{42 \text{ gal}} = 8,34 \text{ mL}$$

Con estos factores de conversión claros, cuantificamos la cantidad de aceite, agua y demás compuestos para la elaboración de los lodos, como en la preparación de estos fluidos de perforación lo único que cambia es la composición química de la arcilla organofílica solo se establece las cantidades de material de uno.

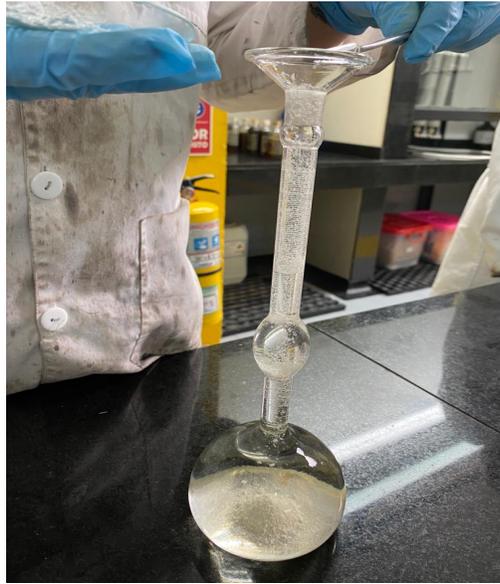
Debido a que la barita no era la misma que se utiliza en Qmax, debimos realizar un experimento extra, el cual fue la medición de la densidad de nuestra barita, el procedimiento fue el siguiente:

- Medir 3,802 gramos de barita en la balanza analítica
- Cargar el picnómetro tipo le chatelier con aceite mineral hasta 18 mL

- Agregar lentamente la barita teniendo especial cuidado de que esta no se quede pegada en las paredes
- Reportar el valor desplazado de aceite: 0,9 mL
- Calcular la densidad de la barita con los datos obtenidos
- $\rho = \frac{3,802g}{0,9 cc} \left(\frac{1lb}{454g} \right) \left(\frac{3785cc}{1gal} \right) = 35,3ppg$

Figura 12.

Le chatelier.



Nota. En la foto se visualiza el proceso para medir la densidad de la barita

Una vez con el valor de la densidad, se procedió con el cálculo de la cantidad de barita que se necesita por barril para alcanzar el peso requerido de 12 ppg.

$$w_B = vol \left(\frac{\rho_f - \rho_i}{1 - \frac{\rho_f}{\rho_B}} \right)$$

Donde:

w_B : Peso barita [lb]

vol: Volumen a densificar [mL]

ρ_f : Densidad final [ppg]

ρ_i : Densidad inicial [ppg]

ρ_B : Densidad de la barita [ppg]

$$w_B \approx 350 \text{ mL} \left(\frac{1 \text{ gal}}{3785 \text{ mL}} \right) \left(\frac{12 - 7,95}{1 - \frac{12}{35,3}} \right) \approx 0.5673825 \text{ lb} \left(\frac{454 \text{ g}}{1 \text{ lb}} \right) \approx 257 \text{ g}$$

Recordando la relación hecha anteriormente, concluimos que se necesitaron 257 gramos de barita por cada barril de lodo para subir el peso de 7,95 ppg a 12 ppg, la tabla 3 describe la cantidad de material para uno y tres barriles de lodo, esto con el fin de tener suficiente fluido para realizar todas las pruebas; en total se cuenta con 1050 mL de cada muestra.

Tabla 3.

Formulación OBM densidad 12 ppg para cada uno de los lodos.

PRODUCTOS	1 bbl	3 bbl
Aceite(mL)	220,5	661,5
Agua (mL)	52,5	156,5
Cal Hidratada (g)	6	18
Arcilla Organofílica (g)	6	18
Emulsificante Primario (mL)	6,7	20,1
Emulsificante Secundario (mL)	5	15
CaCl₂ (g)	6	18
Controlador de Filtrado tipo Gilsonita (g)	6	18
Carbonato de Calcio (50/50 de M600 y M200) (g)	30	90
Barita (g)	257	771

Nota. Cuantificación de los materiales empleados para cada tipo de lodo. Fuente:

Qmax.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se hace la comparación entre el fluido presentado como lodo convencional y los propuestos (lodo benzalconio y lodo amonio). Una vez se analicen los resultados se seleccionará el lodo con mejores propiedades reológicas, tixotrópicas y viscosificantes.

3.1 Comparación de los resultados de laboratorio

Los resultados de las pruebas de los tres fluidos están representados en las tablas 4, 6 y 7 así que se compararan los valores para seleccionar la mejor alternativa.

3.1.1 Pruebas básicas

Las pruebas básicas son aquellas que se pudieron realizar en el laboratorio de la universidad. En todas las pruebas los resultados se presentarán en el siguiente orden: lodo convencional, lodo benzalconio y lodo amonio.

a) **Densidad.** Las densidades fueron de 12, 12.5 y 12.2 (ppg) respectivamente, el fluido base utilizado fue biodiesel de la estación de servicio Primax el cual tiene una densidad de 7.95 ppg. Las variaciones de esta propiedad no son relevantes.

Tabla 4.

Mediciones de reómetro y densidad.

Prueba	Lodo Convencional	Lodo Benzalconio	Lodo Amonio
Densidad	12	12,5	12,2
RPM 600	52	25	26
RPM 300	37	15	16
RPM 200	30,5	11	11
RPM 100	23	7	6
RPM 6	12	2	3
RPM 3	9	2	3

Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos mediante ensayos físicos en laboratorio de la densidad y lecturas del reómetro.

b) **Viscosidad plástica.** Para el caso de las viscosidades plásticas se tienen valores significativamente diferentes 15, 10 y 10 (cP) respectivamente, si solo se tuviera en cuenta este

parámetro y la densidad para la selección del fluido, se escogería el lodo de amonio, debido a que es el que presenta la densidad más parecida a la que se quiere llegar y tiene la viscosidad plástica más baja.

- c) **Viscosidad aparente.** Los resultados de esta prueba fueron 26, 12.5 y 13 (cP) respectivamente. Al igual que con la viscosidad plástica, los valores de los fluidos propuestos son muy bajos, para estas dos propiedades lo ideal es tenerlas lo más pequeño posible, sin embargo, estos influyen en que el punto cedente sea también muy bajo
- d) **Punto cedente.** El parámetro del punto cedente es fundamental para la selección del fluido adecuado, debido a que el YP es utilizado para evaluar la capacidad de un lodo de evacuar los cortes de perforación a superficie. [16] Los resultados de esta propiedad fueron 22, 5 y 6 ($lb/100ft^2$) con lo cual se llega a la conclusión de que el único fluido capaz de cumplir la función de limpiar cortes es el lodo convencional. (La figura 12 da una representación más ilustrativa de las diferencias en las magnitudes de los fluidos en las tres últimas pruebas)
- e) **Geles.** Al igual que con el punto cedente, los valores de los fluidos presentados son extremadamente bajos (geles @ 10 seg: 17, 3 y 3 $lb/100ft^2$; geles @ 10 min: 20, 3, 3 $lb/100ft^2$). Lo cual indica la poca capacidad que tendrían estos fluidos de mantener los ripios en suspensión cuando las bombas estén apagadas. Solo se realizaron mediciones a 10 segundos y 10 minutos debido a que los resultados del lodo convencional no fueron tan diferentes lo cual indica una rápida estabilización, de lado de los fluidos propuestos, ambos mostraron el mismo valor en los dos tiempos en que se corrieron la prueba.

Tabla 5.

Viscosidades y punto cedente.

Prueba	Lodo Convencional	Lodo Benzalconio	Lodo Amonio
Viscosidad plástica (cP)	15	10	10
Punto cedente (lb/100ft²)	22	5	6
Viscosidad aparente (cP)	26,0	12,5	13,0
Esfuerzo gel (10 seg)	17	3	3
Esfuerzo gel (10 min)	20	3	3

Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos mediante ensayos físicos en laboratorio del comportamiento de la viscosidad frente a una temperatura de 150°F.

- f) **Retorta.** Con el fin de validar la relación de fluidos se realizó esta prueba, en la tabla 5 se evidencian los resultados y los respectivos porcentajes de aceite y agua. La relación teórica es 80/20 por lo que se puede evidenciar un comportamiento muy parecido de todos los fluidos con lo presentado teóricamente. En las figuras 13, 14 y 15 se tiene una representación más ilustrativa.

Tabla 6.

Retorta y relación de líquidos.

Retorta			
Sólidos	20,0%	18,0%	18,0%
Agua	14,0%	16,0%	18,0%
Aceite	66,0%	66,0%	64,0%
Líquidos			
%Agua	17,5%	19,5%	22,0%
%Aceite	82,5%	80,5%	78,0%

Nota. Esta tabla representa los resultados de la retorta para los diferentes tipos de lodos realizados.

3.1.2 Pruebas especiales

En este proyecto al trabajar con lodos base aceite, se comprometió a realizar una serie de pruebas que son fundamentales para estos tipos de fluidos.

- a) **Lubricidad.** El objetivo de esta prueba fue corroborar que los tres fluidos tuvieran el mismo coeficiente y por ende nuestra arcilla organofílica no tuviera incidencia en este parámetro, se llega a la conclusión de que el lodo preparado con benzalconio no presente una variación significativa de la lubricidad, sin embargo, el lodo preparado con amonio presenta un ligero pero significativo aumento en la lectura del lubricímetro y por ende en el coeficiente de lubricidad (ver tabla 7)
- b) **Filtrado HPHT.** Los resultados de esta prueba fueron también decisivos para llegar a la conclusión de que nuestro producto no es eficiente a la hora de hacer su trabajo, la cantidad de filtrado fue de 7, 90 y 18 (mL). El valor de 7mL es el más bajo y corresponde al lodo convencional sin embargo según API es un valor muy alto, debido a que, un valor aceptable ronda hasta 4mL. Teniendo en cuenta el valor recomendado por la API y los resultados del filtrado para los lodos propuestos indican que son demasiado altos para un OBM lo que significa la pérdida de agua que pasa hacia la formación permeable cuando el fluido se somete a una presión diferencial alta y una temperatura de 250°C.
- c) **Estabilidad eléctrica.** Esta prueba confirmó que la emulsión no se había formado de la manera correcta en los fluidos propuestos debido a que los resultados fueron 1227, 510 y 448 (mV) se evidencia una gran diferencia entre el lodo convencional y los lodos propuestos.

Tabla 7.

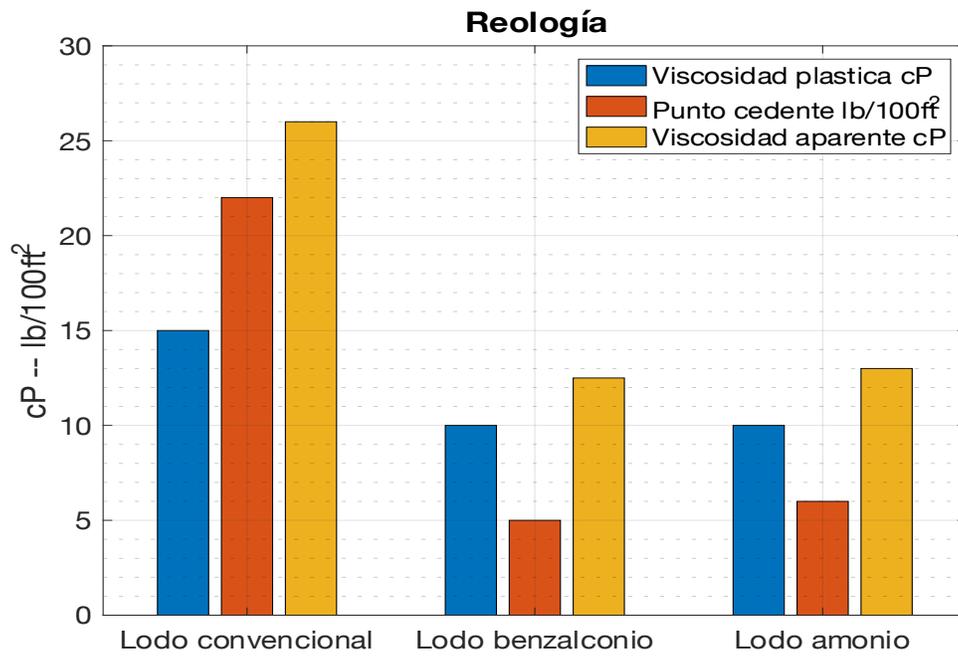
Pruebas especiales OBM.

Pruebas Especiales			
HPHT (mL)	7	90	18
Lectura lubricímetro	6,5	6,8	8,1
Lubricidad	0,068835	0,072012	0,085779
Estabilidad eléctrica (mV)	1227	510	488

Nota. Esta tabla representa los resultados de las pruebas especiales de los OBM realizadas en la empresa Qmax.

Figura 13.

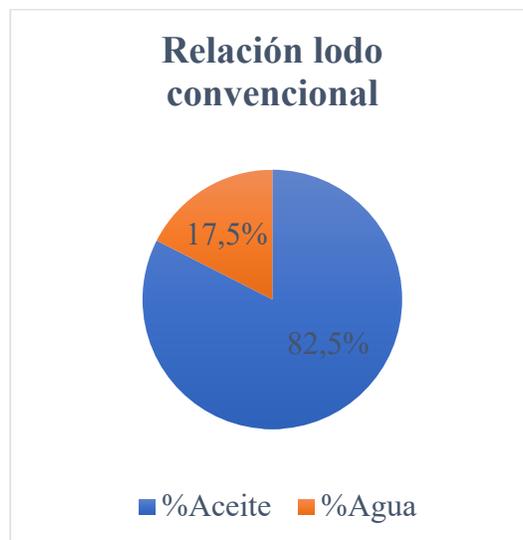
Reología de las muestras.



Nota. En esta figura se representan tres variables medidas por medio del reómetro Fann, la viscosidad plástica, aparente y el punto cedente, teniendo en cuenta que el punto cedente se encuentra en unidades diferentes se colocó un eje secundario solo para esta variable.

Figura 14.

Relación de líquidos del lodo convencional.



Nota. Representación gráfica de la relación aceite agua del lodo convencional.

Figura 15.

Relación de líquidos del lodo benzalconio.



Nota. Representación gráfica de la relación aceite agua del lodo benzalconio.

Figura 16.

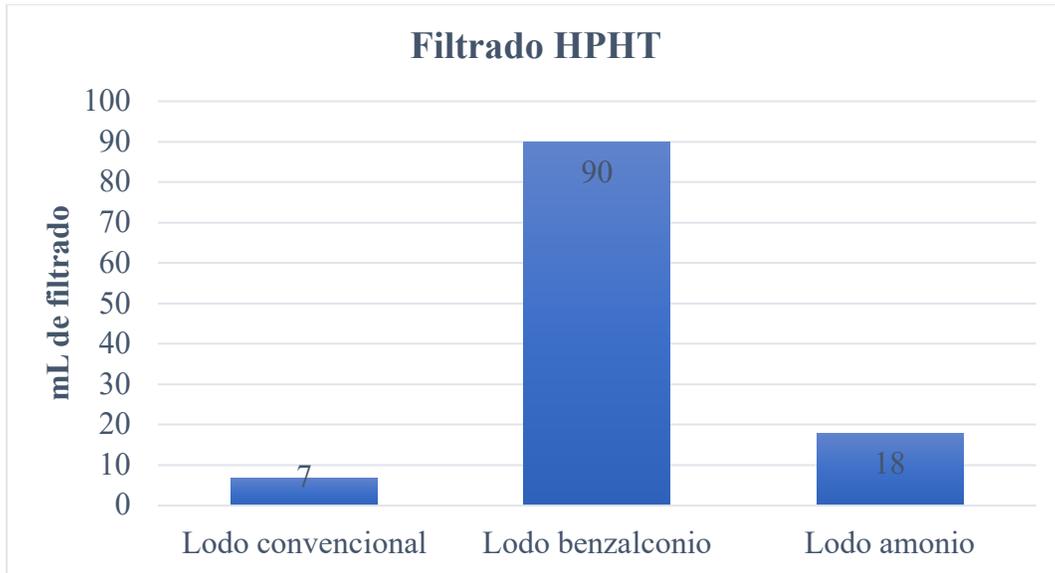
Relación de líquidos del lodo amonio.



Nota. Representación gráfica de la relación aceite agua del lodo amonio.

Figura 17.

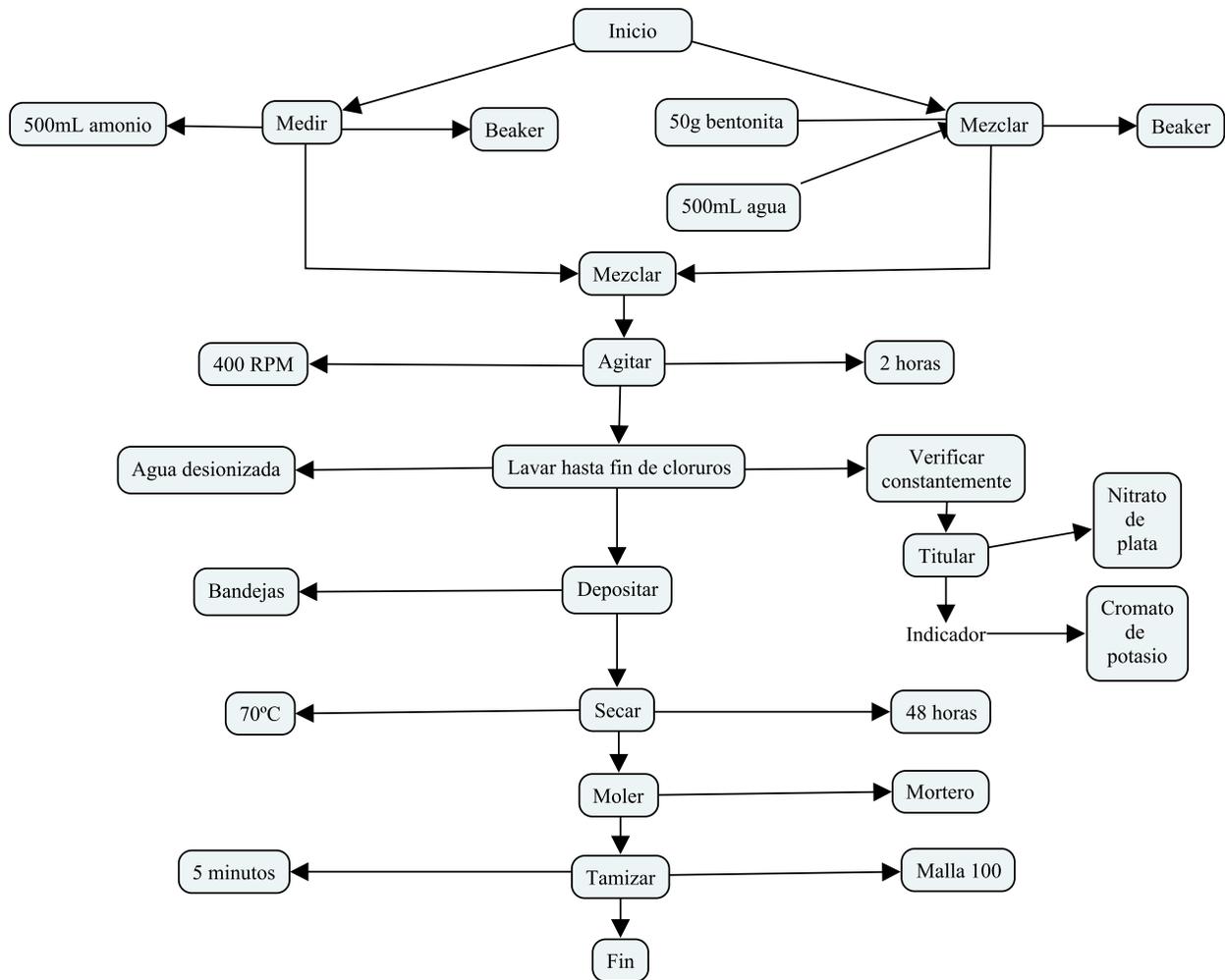
Filtrado HPHT de las muestras.



Nota. En esta figura se puede evidenciar los mililitros del filtrado HPHT para el lodo convencional y los lodos propuestos.

Figura 18.

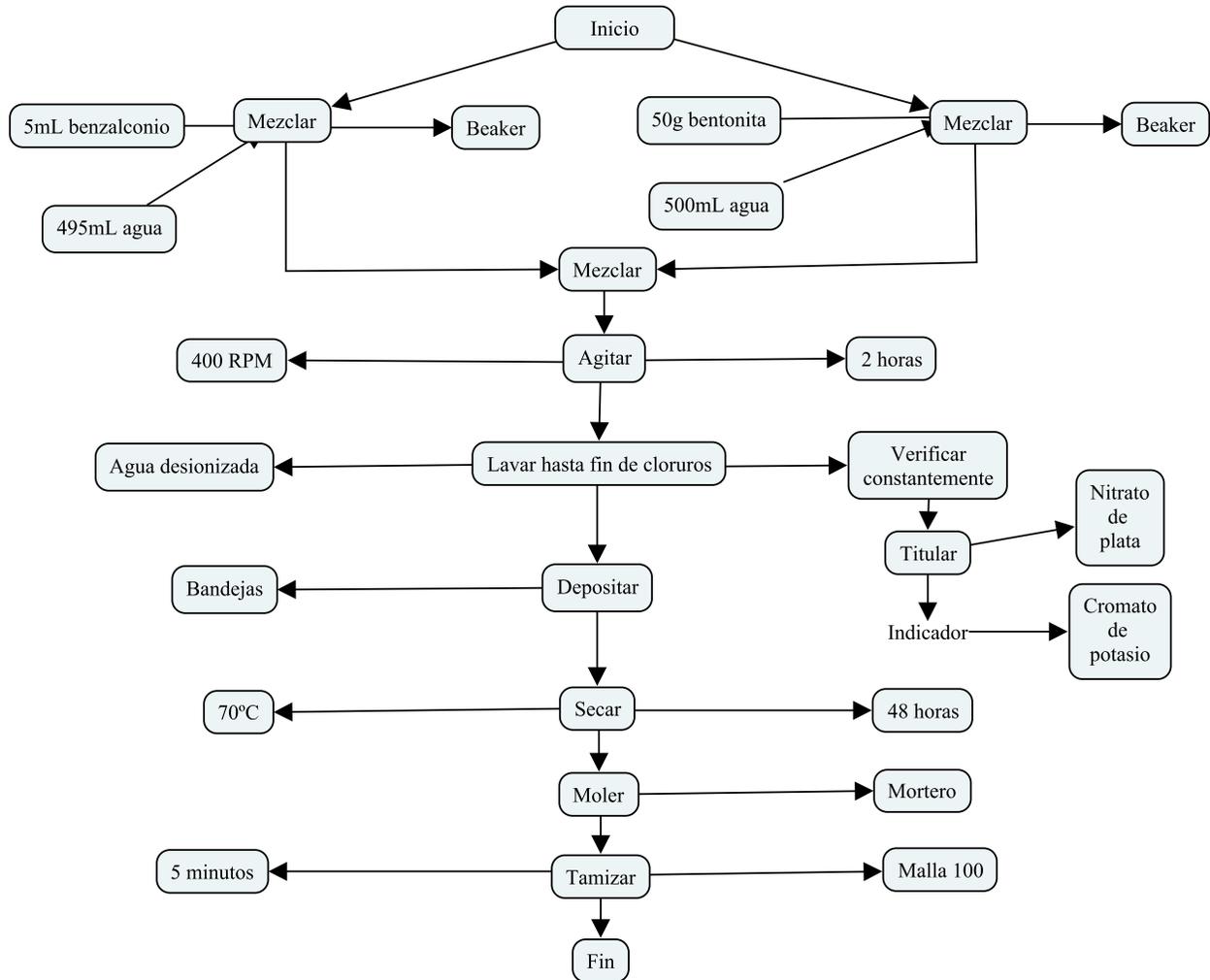
Diagrama de flujo, lodo con amonio



Nota. En esta figura se ve de manera resumida el procedimiento para sintetizar la arcilla organofílica con amonio cuaternario de quinta generación.

Figura 19.

Diagrama de flujo, lodo con benzalconio



Nota. En esta figura se ve de manera resumida el procedimiento para sintetizar la arcilla organofílica con cloruro de benzalconio

4. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este proyecto solo se varió un aditivo, por lo tanto, se centró en comparar los costos de los materiales empleados para sintetizar las arcillas organofílicas.

Primero se calculó el precio de la cantidad de arcilla organofílica necesaria para un gramo, luego se hizo un escalado para obtener el un valor de los materiales en libras.

- La bentonita tiene un precio de 2.500 COP por kilogramo, con lo cual el gramo de bentonita es 2,5 COP.
- El amonio cuaternario de quinta generación tiene un precio de 10.000 COP por litro, con lo cual el mililitro es de 10 COP.
- El cloruro de benzalconio tiene un precio de 50.000 COP por litro, con lo cual el mililitro es de 50 COP.
- No se tomará en cuenta el valor del agua debido a que este puede ser obtenida con facilidad.

Para ambos casos, la cantidad de arcilla sintetizada fue de 18 gramos.

4.1 Costo de la arcilla organofílica preparada con amonio cuaternario de quinta generación.

Tabla 8.

Costos de materiales, arcilla sintetizada con amonio cuaternario de quinta generación.

Material	Costo/U (COP)	Cantidad	Total
Bentonita	2,5	50g	125COP
Amonio	10	500mL	5000COP

Nota. En la tabla se representa solo el valor de las cantidades usadas para preparar 18 gramos de arcilla.

Con la tabla anterior podemos concluir que el costo de los materiales para preparar 18 gramos de arcilla organofílica es de 5.125 COP

Para facilitar los cálculos, procedemos a dividir 5.125 COP en 18 lo cual da como resultado 285 COP

Teniendo claro este precio y que el lodo en campo necesita 6 libras por barril de arcilla, podemos encontrar el precio de los materiales requeridos para preparar esta cantidad de arcilla organofílica.

$$285 \frac{COP}{g} * 6 lb * \left(\frac{453 g}{1 lb} \right) = 774.630 COP$$

El precio de la arcilla organofílica comercial es de 16.000 COP por kilogramo, con lo cual.

$$16.000 \frac{COP}{kg} * 6 lb * \left(\frac{0,453 kg}{1 lb} \right) = 43.488 COP$$

Con los cálculos anteriores podemos inferir fácilmente que la arcilla organofílica preparada con amonio cuaternario de quinta generación no es económicamente viable.

4.2 Costo de la arcilla organofílica preparada con cloruro de benzalconio

Tabla 9.

Costos de materiales, arcilla sintetizada con cloruro de benzalconio.

Material	Costo/U	Cantidad	Total
Bentonita	2,5 COP	50g	125COP
Cloruro de benzalconio	50 COP	5mL	250COP

Nota. En la tabla se representa solo el valor de las cantidades usadas para preparar 18 gramos de arcilla.

Con la tabla anterior podemos concluir que el costo de los materiales para preparar 18 gramos de arcilla organofílica es de 375 COP

Para facilitar los cálculos, procedemos a dividir 375 COP en 18 lo cual da como resultado 20,9 COP

Teniendo claro este precio y que el lodo en campo necesita 6 libras por barril de arcilla, podemos encontrar el precio de los materiales requeridos para preparar esta cantidad de arcilla organofílica.

$$20,9 \frac{COP}{g} * 6 lb * \left(\frac{453 g}{1 lb} \right) = 56.806 COP$$

El precio de la arcilla organofílica comercial es de 16.000 COP por kilogramo, con lo cual.

$$16.000 \frac{COP}{kg} * 6 lb * \left(\frac{0,453 kg}{1 lb} \right) = 43.488 COP$$

Con los cálculos anteriores podemos inferir fácilmente que la arcilla organofílica preparada con cloruro de benzalconio no es económicamente viable.

5. CONCLUSIONES

La viscosidad plástica es indispensable a la hora de seleccionar un fluido de perforación adecuado, por ello se realizó la prueba en el viscosímetro Fanny la cual dio valores muy bajos para los tres lodos lo cual indica que son buenos en un principio, sin embargo, debido a que esta propiedad va de la mano con el esfuerzo gel; el único fluido que cumplió con los parámetros de la norma API 13B-2 fue el lodo convencional con un valor de 15 cP.

Al igual que la viscosidad plástica, la viscosidad aparente debe tener valores bajos para que la broca no consuma más energía de la necesaria y asimismo exista una buena tracción, sin embargo esta característica influye directamente en el punto cedente, debido a esto, los fluidos de perforación desarrollados en el proyecto investigativo no cumplieron las expectativas a nivel de punto cedente puesto que los valores de viscosidad aparente son bajos pero el punto cedente es insignificante, este parámetro (punto cedente) es importante debido a que su función es mantener en suspensión los ripios y circularlos de fondo a superficie.

Térmicamente las arcillas organofílicas no fueron lo suficientemente estables para pozos HPHT (>300°F) debido a que presenta niveles altos de filtración del fluido hacia la formación.

Un fluido de perforación tiene una emulsión estable cuando el valor es mayor a los 700 mv, según norma API 13B-2 por lo que, para los fluidos de perforación implementados en esta investigación, los resultados de 510 mv y 448 mv no son lo suficientemente estables y se puede romper la emulsión durante la operación lo que incurre en gastos y tiempos no productivos.

En la prueba especial HPHT la cantidad de filtrado fue 90 ml y 18 ml para el benzalconio y el amonio cuaternario respectivamente por lo cual se difiere que son valores extremadamente altos y que a pozos de alta presión y alta temperatura los fluidos van a presentar una filtración de agua a la formación permeable.

El único fluido capaz de cumplir la función de limpiar ripios es el lodo convencional con un punto cedente de 22 lb/100ft² y una viscosidad plástica relativamente baja.

Se difiere de la investigación que las arcillas modificadas con los compuestos químicos utilizados no dieron los resultados esperados siendo así mejor la arcilla organofílica comercial.

Los fenómenos de tixotropía, reología, y viscosidad no fueron los esperados debido a que la suspensión de recortes y los geles no son lo suficientemente altos para la implementación en campo.

No es económicamente viable el proyecto debido a los altos costos de la sintetización de la arcilla organofílica, por ende, el aditivo reológico comercial es más rentable.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] One Petro, “Characteristics and Application of an Oil-base Mud”, [Online] Disponible: https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-941070-G?sort=&start=0&q=+Characteristics+and+Application+of+an+Oil-base+Mud&from_year=&peer_reviewed=&published_between=&fromSearchResults=true&to_year=&rows=25#
- [2] José Mata, Manual de perforación, 1ª ed., Universidad de Oriente., Venezuela, 2017
- [3] Ryen Caenn, H.C.H. Darley and George R. Gray. (2017) Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Seventh Edition) [Online] DOI: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04159-4>
- [4] E. Garnica Martínez, *Ingeniero geólogo y su participación en la industria petrolera en el registro de hidrocarburos*, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF, México, 2011
- [5] M. Hernández, «slideshare,» 24 03 2017. [En línea]. disponible: <https://tinyurl.com/a6g6vbfu>. [Último acceso: 20 02, 2020].
- [6] F. Gonzáles, «Funciones del fluido de perforación,» *La comunidad petrolera*, vol. 1, n° 1, p. 2, 2003.
- [7] R. Caenn, G. V. Chillingar “Drilling fluids: State of the art” *JPSE*, vol. 14, no. 4, pp. 221-230, jun, 1996, [En línea] doi: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00051-8](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00051-8) [Acceso: febrero 11, 2021]
- [8] Manual de fluidos baroid, baroid the complete fluids company., Houston Texas, EE. UU., 2000

- [9] J.W. Galate and R.F. Mitchell, «Behavior of Oil Muds During Drilling Operations, » *SPE Drilling Engineering*, vol. 1, n° 02, p. 250, 1986.
- [10] D. fluids, «Netwas Group Oil, » 17 01 2021. [En línea]. Available: <https://www.netwasgroup.us/fluids-2/disadvantages-of-oil-muds.html>. [Último acceso: 20 02 2021].
- [11] D.D. Schmidt, A.J. Roos, J.T. Cline., “*Interaction of Water with Organophilic Clay in Base Oils to Build Viscosity*”, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 1987.
- [12] P. S.A., «Proquimia,» 01 04 2020. [En línea]. Disponible: <https://tinyurl.com/679k3uju>. [Último acceso: 15 03 2021].
- [13] M. C. S.A.S., «Marletty company,» 23 12 2018. [En línea]. Disponible: <https://marletti.net/antecedentes-teoricos-de-los-amonios-cuaternarios/#>. [Último acceso: 15 03 2021].
- [14] Schlumberger, “Oilfield glossary”, escrito por Schlumberger Limited, [En línea]. Disponible en: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/terms/o/overbalance>
- [15] Instituto Americano de Petróleo, (Año), *Manual de fluidos de perforación procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación*, [En línea] disponible en: <https://tinyurl.com/26zpmrrt>
- [16] Fluidos de perforación, 1ª ed., PDVSA, Caracas, Venezuela, 2002, [En línea] disponible en: <https://tinyurl.com/4k7kw74t>
- [17] R. Leguizamo y D. R. Leguizamo, *Propiedades fundamentales del fluido de perforación*, 1ª ed, Bogotá D.C., Solids Control School, 2018 ISBN: 978-958-48-3948-0

- [18] Lenntech: soluciones innovadoras de tratamiento de agua y separación de membranas. (s.f). “pH y alcalinidad”. [En línea] <https://tinyurl.com/1873o2h6>. [Acceso: febrero 17, 2021]
- [19] A. M. Maldonado. B., *Formulación y evaluación de fluidos de perforación base agua de alto rendimiento aplicados al campo balcón como sustitutos de lodos base aceite*, tesis pre, Facultad de ingenierías físico-químicas, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [20] J. Gomez, «Perforador 2.0,» 03 12 2017. [En línea]. Available: <https://perforador20.wordpress.com/2017/12/03/filtro-prensa-api-ht-hp/>. [Último acceso: 30 03 2021].
- [21] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

GLOSARIO

Amina cuaternaria: una sal de amina catiónica en la que el átomo de nitrógeno tiene cuatro grupos unidos a ella y lleva una carga positiva. Las aminas cuaternarias se utilizan como agentes mojantes del petróleo, inhibidores de corrosión y de las lutitas y bactericidas.

Alcalinidad: Es la capacidad de una solución para reaccionar con un ácido.

Arcilla organofílica: minerales de arcilla cuyas superficies fueron revestidas con una sustancia química para hacerlos dispersables en aceite. La bentonita y la hectorita (arcillas en forma de placa) y la atapulgita y la sepiolita (arcillas en forma de vara) son tratadas con agentes mojantes del petróleo durante la fabricación y se utilizan como aditivos para lodos a base de aceite.

Emulsión inversa: una emulsión en la que el aceite es la fase continua o externa y el agua es la fase interna. Emulsión inversa normalmente se refiere a un lodo a base de aceite y los términos se consideran sinónimos. Los lodos de emulsión inversa pueden tener de 5 a 50% de agua en la fase líquida, aunque hay sistemas que son 100% aceite.

Estabilidad eléctrica: es la propiedad relacionada con la estabilidad de la emulsión y su capacidad de impregnarse con el aceite

Fase continua: la fase continua de una emulsión. La fase interna son las gotitas dispersas del fluido emulsionado.

Fase interna: la fase discontinua de una emulsión, las gotículas dispersas de fluido emulsionado.

Fluido de perforación: cualquiera de una serie de fluidos líquidos y gaseosos y mezclas de fluidos y sólidos (en forma de suspensiones de sólidos, mezclas y emulsiones de líquidos, gases y sólidos) utilizados en operaciones de perforación de pozos de sondeo en la tierra.

Fluido newtoniano: es una sustancia homogénea que se deforma continuamente ante la aplicación de una tensión, independientemente de la magnitud de esta.

Geles: es el esfuerzo de corte del lodo que es medido a baja tasa de corte después de que el fluido ha permanecido estático por un cierto periodo específico. (10 segundos y 10 minutos)

Intercambio catiónico: la cantidad de iones de carga positiva (cationes) que puede admitir un mineral de arcilla o un material similar en su superficie de carga negativa, expresada como miliequivalente por 100 g, o más comúnmente como miliequivalente (meq) por 100 g.

Oil base mud: un lodo de emulsión inversa o una emulsión cuya fase continua es aceite.

Punto cedente: es el esfuerzo cortante mínimo necesario para la deformación de un fluido y que este comience a desplazarse.

Reología: por lo general, el estudio de la manera en que se deforma y fluye la materia; incluye su elasticidad, plasticidad y viscosidad.

Tixotropía: la característica de un fluido, tal como el lodo de perforación, de formar una estructura gelificada con el tiempo cuando no está sujeto a cizalladura y luego fluidificarse cuando es agitado. La viscosidad del fluido tixotrópico cambia con el tiempo a una velocidad de corte constante hasta alcanzar el equilibrio.

Viscosidad aparente: la viscosidad de un fluido medida a una determinada velocidad de corte y a una temperatura fija. Para que una medición de la viscosidad sea significativa, la velocidad de corte debe ser expresada o definida.

Viscosidad plástica: es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica del fluido de perforación en movimiento entre: sólidos-sólidos, sólidos-líquidos y líquidos-líquidos.

Water base mud: un fluido de perforación (lodo) en el que el agua o el agua salada son la fase líquida principal, así como la fase mojante (externa). Las categorías generales de lodos a base de agua son: agua dulce, agua de mar, agua salada, cal, potasio y silicato. Abundan las subcategorías de éstas.

RECOMENDACIONES

Se sugiere implementar en los lodos sintetizados un envejecimiento dinámico con el fin de simular las condiciones reales de temperatura y presión a las cuales se desea llegar y así obtener un valor más cercano al esperado.

Se sugiere utilizar para sintetizar la arcilla organofílica otras sales de amonio cuaternario de preferencia en forma sólida para que la disolución sea más efectiva, como la sal de Merck millpore (cloruro de alquil-bencil-dimetil amonio o cloruro de N alquil-dimetil-bencil-amonio).

Se recomienda sintetizar la arcilla organofílica por método seco, con el fin de evaluar los resultados de laboratorio, hacer una comparativa con el método húmedo el cual se realizó en este proyecto y evaluar la rentabilidad económica y la eficiencia técnica del proyecto.