

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN  
ECOLÓGICO “NATFLEX”**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
PETRÓLEOS**

**HECTOR ALEXIS CASTELLANO PROANO**  
hector.castellano@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. PABLO DANIEL BENALCAZAR FLORES**  
pablo.benalcazar@epn.edu.ec

**Quito, abril 2022**

## DECLARACIÓN

Yo, Héctor Alexis Castellano Proaño, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



---

**HECTOR CASTELLANO**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Héctor Alexis Castellano Proaño, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo Benalcazar', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat illegible.

**ING. PABLO BENALCAZAR**  
**DIRECTOR DE TESIS**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a Dios por sus infinitas bendiciones y a mis padres por su apoyo y amor incondicional.

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el Ingeniero Pablo Benalcázar por su orientación, su tiempo y su experiencia los cuales han sido elementos muy importantes para la culminación de esta tesis.

De igual forma, quiero extender mi gratitud a la Empresa de Sólidos Nacionales SLN, por abrirme las puertas y permitirme realizar mi investigación dentro de su entidad, en especial a los Ingenieros Freddy Robalino y Neyro Rodríguez por su confianza y apoyo.

Un agradecimiento profundo a la Facultad de Geología y Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional y a mis profesores por todos sus conocimientos brindados año tras año.

Finalmente, gracias a mis amigos por acompañarme y alentarme en esta etapa tan importante en mi vida.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar mi trabajo de investigación a mi madre Cecilia Proaño y mi padre Héctor Castellano quienes son las personas más importantes en mi vida y siempre serán mi ejemplo de amor, constancia y superación. A mi hermana y hermanos por su cariño incondicional y por ser mi soporte en todo momento. Y finalmente a toda mi familia por siempre confiar en mí.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>DECLARACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>V</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>SIMBOLOGÍA</b> .....	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XI</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definición de Fluidos de Perforación .....	1
1.2 Tipos de Fluidos de Perforación .....	1
1.2.1 Lodos base agua .....	2
1.2.2 Lodos Base aceite .....	3
1.3 Composición de los Fluidos de Perforación .....	3
1.3.1 Aditivos de los Fluidos de Perforación .....	3
1.4 Funciones de los Fluidos de Perforación .....	5
1.4.1 Capacidad de transporte (ripios de perforación a superficie).....	5
1.4.2 Enfriar y lubricar la broca .....	5
1.4.3 Formar revoque/costra de lodo adecuada.....	5
1.4.4 Controlar la presión de la formación.....	5
1.4.5 Capacidad de suspensión.....	6
1.4.6 Estabilidad .....	6
1.4.7 Minimizar el daño de la formación.....	6
1.4.8 Transmitir potencia hidráulica a la sarta de perforación .....	7
1.4.9 Controlar la corrosión en la sarta de perforación.....	7
1.4.10 Minimizar el impacto ambiental .....	7
1.5 Propiedades de los Fluidos de Perforación .....	7
1.5.1 Propiedades físicas.....	7
1.5.2 Propiedades Químicas.....	14
1.6 Fluido de Perforación Natflex .....	14
1.7 Litología de la Zona Intermedia .....	18

<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
2.1 Diseño del Fluido de perforación base .....	20
2.2 Procedimiento de preparación del fluido de perforación en el laboratorio .....	21
2.3 Elaboración del fluido de perforación base .....	23
2.4 Selección del fluido de perforación base .....	23
2.5 Diseño del Fluido de Perforación Natflex.....	24
2.6 Análisis y Pruebas de Laboratorio del Fluido de Perforación .....	26
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>31</b>
<b>DATOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>31</b>
3.1 Resultados de las pruebas de laboratorio (fluido de perforación base) .....	31
3.2 Resultados de las pruebas de Laboratorio realizadas al Fluido Natflex .....	33
3.3 Resultados Experimentales del Análisis de Índice del Rendimiento. ....	36
3.4 Resultados experimentales del Ensayo de Hinchamiento.....	36
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>38</b>
<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
4.1 Lodo de perforación base .....	38
4.2 Selección del Fluido de Perforación Base .....	39
4.3 Formulación y pruebas de laboratorio realizadas al fluido de perforación Natflex .....	39
4.3.1 Selección Sistema Rheomax-Bentonita .....	40
4.3.2 Selección sistema Almidón de Yuca – Pac H.....	41
4.3.3 Lodo de perforación Natflex .....	41
4.4 Lodo Base vs Lodo Natflex.....	43
<b>CAPITULO 5</b> .....	<b>46</b>
<b>ANALISIS ECONÓMICO</b> .....	<b>46</b>
5.1 Costo por Producto.....	46
5.2 Costo por Pie.....	46
5.3 Costo por Lump Sum.....	46
5.4 Costo de Productos.....	47
5.5 Volúmenes del Fluido para la Sección de 12,25 Pulgadas .....	48
5.6 Volúmenes de Fluido por la Sección Intermedia de 12.25 pulgadas.....	49
5.7 Cálculo y Comparación de Costos.....	52
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>54</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>54</b>
6.1 Conclusiones.....	54
6.2 Recomendaciones.....	55
<b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>56</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>57</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Aditivos utilizados normalmente en la sección intermedia.....	4
<b>Tabla 2</b> Aditivos y concentración requerida para la sección 12.25 pulgadas.....	21
<b>Tabla 3</b> Formulación de las muestras de lodo base.....	23
<b>Tabla 4</b> Propiedades referenciales para la sección 12.25 pulgadas .....	24
<b>Tabla 5</b> Aditivos Ecológicos.....	24
<b>Tabla 6</b> Aditivos para la elaboración del Fluido de Perforación Natflex.....	25
<b>Tabla 7</b> Concentraciones del Fluido de Perforación Natflex.....	26
<b>Tabla 8</b> Resultados de densidad para las cuatro muestras de lodo base .....	31
<b>Tabla 9</b> Resultados reológicos y tixotrópicos de los fluidos de perforación base .....	32
<b>Tabla 10</b> Resultados de filtrado API para las muestras de lodo base .....	32
<b>Tabla 11</b> Resultados del contenido de arena para las muestras de lodo base.....	33
<b>Tabla 12</b> Resultados de Ph para las muestras de lodo base .....	33
<b>Tabla 13</b> Resultados de densidad para los lodos Natflex .....	34
<b>Tabla 14</b> Resultados reológicos y tixotrópicos del lodo Natflex.....	34
<b>Tabla 15</b> Resultados numéricos de Filtrado API para los lodos Natflex .....	35
<b>Tabla 16</b> Resultados numéricos de contenido de Arena para los lodos Natflex .....	35
<b>Tabla 17</b> Resultados numéricos de pH para los lodos Natflex .....	36
<b>Tabla 18</b> Resultados de ensayo de hidratación .....	36
<b>Tabla 19</b> Resultados de ensayo de hinchamiento .....	37
<b>Tabla 20</b> Propiedades referenciales de lodos base para la sección 12.25 pulgadas... 38	
<b>Tabla 21</b> Propiedades experimentales del Lodo base 3 .....	39
<b>Tabla 22</b> Propiedades analizadas para los lodos Natflex.....	42
<b>Tabla 23</b> Valores experimentales Lodo Base y Lodo Natflex 2. ....	43
<b>Tabla 24</b> Resultados de la prueba de índice de rendimiento .....	45
<b>Tabla 25</b> Costo de cada producto químico .....	47
<b>Tabla 26</b> Libras requeridas por producto para la sección intermedia (fluido base).....	50
<b>Tabla 27</b> Libras requeridas por producto para la sección intermedia (fluido natflex) ...	50
<b>Tabla 28</b> Cantidad de Sacos-Tambores por producto fluido base.....	51
<b>Tabla 29</b> Cantidad de Sacos-Tambores por producto fluido natflex.....	51
<b>Tabla 30</b> Costos Sección 12.25 Pulgadas (fluido base).....	52
<b>Tabla 31</b> Costos Sección 12.25 Pulgadas (fluido natflex) .....	52
<b>Tabla 32</b> Tabla de resultados de reología y tixotropía de los sistemas para calcular la viscosidad.....	57
<b>Tabla 33</b> Resultados de las pruebas de volumen de filtrado sistemas de control de filtrado.....	59
<b>Tabla 34</b> Reología y Tixotropía base vs Natflex.....	61

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Tipos de Fluidos de Perforación.....	1
<b>Figura 2</b> Balanza de Lodo (medición de la densidad).....	8
<b>Figura 3</b> Viscosímetro rotativo.....	9
<b>Figura 4</b> Prensa de filtrado API (determinación del filtrado API).....	13
<b>Figura 5</b> pH-metro digital (determinación del pH).....	13
<b>Figura 6</b> Aditivo Ecológico Rheomax.....	15
<b>Figura 7</b> Aditivo Ecológico Almidón de Yuca.....	16
<b>Figura 8</b> Aditivo Ecológico Bioasfalto.....	17
<b>Figura 9</b> Aditivo Ecológico Lubridrill.....	18
<b>Figura 10</b> Columna Estratigráfica de la Cuenca Oriente.....	19
<b>Figura 11</b> Procedimiento para la preparación del lodo de perforación.....	22
<b>Figura 12</b> Horno de Rolado.....	27
<b>Figura 13</b> Proceso elaboración de pastilla de formación.....	28
<b>Figura 14</b> Proceso índice de rendimiento.....	30
<b>Figura 15</b> Curva de comportamiento reológico (sistema seleccionado y referencial)..	40
<b>Figura 16</b> Curva de Filtrado sistema seleccionado y sistema referencial.....	41
<b>Figura 17</b> Comportamiento Reológico Lodo Base 3 vs Lodo Natflex 2.....	44
<b>Figura 18</b> Curva de Filtrado API Lodo Base 3 vs Lodo Natflex 2.....	44
<b>Figura 19</b> Índice de rendimiento en porcentaje del Lodo Base y Lodo Natflex.....	45
<b>Figura 20</b> Costo total de la sección intermedia de los lodos seleccionados.....	53
<b>Figura 21</b> Curvas de modelo reológicos sistemas de viscosidad.....	58
<b>Figura 22</b> Curva de filtrado de sistemas de control de filtrado.....	60
<b>Figura 23</b> Densidad de lodo Base y Lodo Natflex.....	61
<b>Figura 24</b> Viscosidad platica y aparente del Lodo Base y Lodo Natflex.....	62
<b>Figura 25</b> Punto Cedente del Lodo Base y Lodo Natflex.....	62
<b>Figura 26</b> pH del Lodo Base y Lodo Natflex.....	63
<b>Figura 27</b> Esquema de densidades.....	64

## SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	DIMENSIONES
API	American Petroleum Institute	
AV	Viscosidad aparente	
bbbl	Barriles	L <sup>3</sup> /t
BPPD	Barriles de Petróleo por Día	L <sup>3</sup> /t
BSW	Contenido de agua y sedimentos	%
BT	Arena Basal Tena	
cc	Centímetros cúbicos	
cp	Centipoise	ML <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup>
csg	Casing	
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	
D	Pozo direccional	
IR	Índice de rendimiento	
ft	Pies	L
°F	Grados Fahrenheit	
gr	gramos	
lb	libras	
lb/gal	Libras por galón	
lpb	Libras por barril	
min	minutos	
mm	milímetros	
MBT	Methylene Blue Test	
MD	Measurement deep	
ppg	Pounds per gallon	
PAC H/L	Poli aniónica Polimérica	
PH	Potencial de Hidrogeno	
PV	Viscosidad plástica	
RPM	Revoluciones por minuto	L/T
SEC	Segundos	
USD	Su estándar internacional	
YP	Yield Point	
%	Tanto por ciento	
$\theta$	Lectura de la viscosidad del viscosímetro	

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como principal objetivo la elaboración de un fluido experimental de perforación tipo Natflex en base a la norma API, este fluido contiene aditivos que son amigables con el ambiente como: Rheomax, Almidón de yuca, Bioasfalto y Lubridrill; estos son de gran utilidad en el proceso de perforación de la sección de 12,25 pulgadas, permitiendo de esta forma obtener las mismas propiedades que tienen los aditivos químicos frecuentemente usados para la sección intermedia. Esta formulación se puede utilizar como referencia para la elaboración de fluidos de perforación en cualquier campo de la cuenca Oriente Ecuatoriana solamente para la sección intermedia.

La metodología aplicada para desarrollar este estudio técnico experimental consistió en la realización de pruebas de laboratorio físicas y químicas a los fluidos formulados. En primer lugar, se formularon cuatro muestras de lodo de acuerdo a los requerimientos de la normativa API. En base a los resultados de laboratorio el fluido base número 3 fue seleccionado considerando las propiedades referenciales de un programa de lodos recomendado para la sección de interés.

La muestra de lodo numero 3 es el fluido que permitió dar inicio a la formulación del lodo ecológico (Natflex), se formularon dos lodos Natflex denominados número 1 y 2, para los cuales se varió las concentraciones efectivas de los aditivos permitiendo elegir la formulación que más se acerca a las propiedades que debe tener el fluido para dicha zona; esto se realizó mediante el análisis de laboratorio de los fluidos de perforación. Adicionalmente a estas muestras se aplicó el índice de rendimiento de arcilla para evaluar el lodo a condiciones de yacimiento. Los resultados del ensayo de hidratación muestra 29.25 % para el lodo Natflex utilizando en su formulación el sistema Rheomax-Bentonita 3-10 [lpb], Barita 75 [lpb], Biosfalto 7 [lpb], glicol 3.5 [lpb] y Lubridrill 7 [lpb]. No se realizó ninguna comparación entre los lodos Natflex 1 y 2 debido a que no se tiene con qué validar y/o comparar.

De acuerdo a los diferentes indicadores económicos nos centramos en la relación costo/beneficio para determinar la factibilidad del proyecto mediante la evaluación económica. Para este tipo de proyectos lo que se realiza es una comparación de los diferentes contratos que se dan entre la empresa operadora y la empresa prestadora de servicios; eligiendo el contrato que resulta más factible para poner en marcha la ejecución del proyecto. Para dicha estimación económica se realizó un análisis técnico que toma en cuenta el cálculo de volúmenes para los fluidos formulados.

## PRESENTACIÓN

El fluido de perforación tipo Natflex es una mezcla de un solvente con aditivos o productos, que cumplen funciones físico-químicas específicas, de acuerdo a las necesidades operativas de una formación a perforar y considerando la normativa API. El fluido de perforación cumple funciones específicas en el proceso de perforación de un pozo petrolero, las cuales varían según la sección a perforar ya que la litología no es la misma en cada zona, el lodo Natflex que se va a diseñar es recomendado para la sección intermedia de 12,25 pulgadas, y la metodología aplicada puede ser considerada como base para la formulación de otro tipo de lodos base agua con aditivos amigables con el ambiente.

El presente proyecto contiene una descripción teórica de fluidos de perforación, conceptos importantes con los cuales se va a desarrollar más adelante el análisis de pruebas de laboratorio y posteriores resultados. Para el diseño del fluido de perforación, se realizaron diferentes pruebas de laboratorio que permiten medir su eficiencia y aplicación en la perforación de algún pozo. Además, tiene por objetivo la elaboración del fluido de perforación con aditivos que son ecológicos ayudando a mejorar la calidad del fluido de perforación siendo menos invasivos con el medio ambiente, bajo las normativas API RP 13B-1, 13 B-2, con el fin de determinar las concentraciones adecuadas de cada producto dentro de la formulación del fluido para sección intermedia.

Posteriormente se presenta el análisis de resultados de las cuatro muestras de lodo base formuladas y de las muestras de lodo Natflex 1 y 2. La prueba de hinchamiento e índice de rendimiento de la arcilla solamente son realizadas para los lodos Natflex. Los resultados de las pruebas de laboratorio permiten determinar la formulación óptima para la sección intermedia. El estudio técnico-económico se realiza para el fluido de perforación Natflex elegido, considerando los datos de costos por producto y costos por pie perforado.

# CAPITULO 1

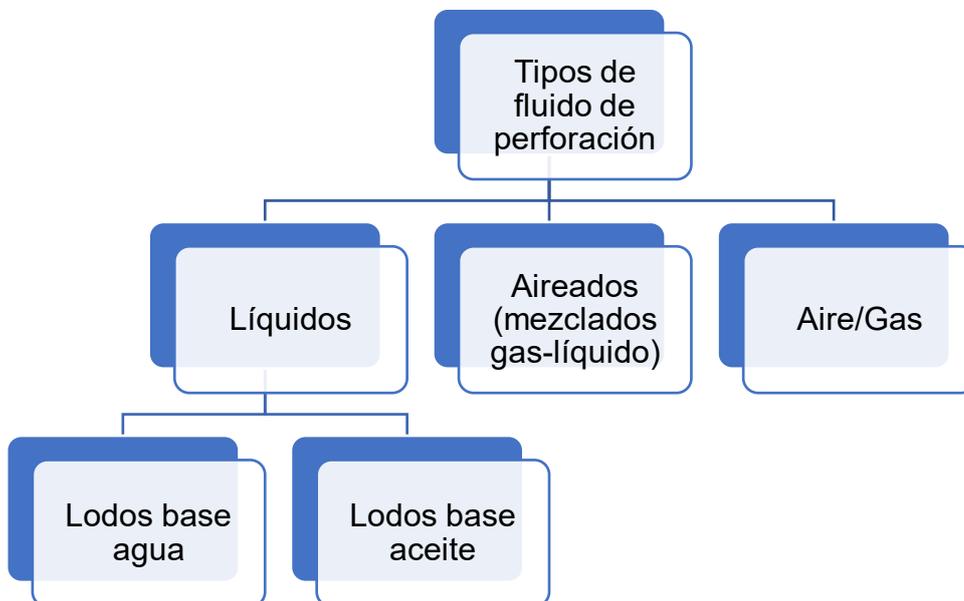
## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Definición de Fluidos de Perforación

El fluido de perforación o también denominado lodo de perforación es una sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas para ser utilizadas en operaciones de perforación. Estas sustancias pueden ser gas, agua y petróleo o combinaciones de ellos con determinado porcentaje de sólidos (Villarroel & Izurieta, 2014). Un fluido de perforación no debe ser tóxico, corrosivo y/o inflamable. Además debe ser estable a altas temperaturas e inmune al desarrollo de bacterias (PDVSA, 2002). El fluido conservará sus propiedades de acuerdo con los requisitos de cada operación (PDVSA, 2002).

### 1.2 Tipos de Fluidos de Perforación

El siguiente diagrama muestra la clasificación de los fluidos de perforación según la formulación del fluido (Villarroel & Izurieta, 2014).



**Figura 1** Tipos de Fluidos de Perforación.

**Fuente:** (Villarroel & Izurieta, 2014)

A continuación, se describe la clasificación de los fluidos de perforación:

### 1.2.1 Lodos base agua

Lodos base agua son aquellas mezclas que al agua se le agrega productos químicos orgánicos, es el tipo de fluido más utilizado debido al menor costo y para minimizar el impacto ambiental en comparación con los lodos base aceite o sintéticos. Las ventajas de este tipo de lodo de perforación son las siguientes (*Perforaciones Tartagal- Salta: Tipos de Lodos de Perforación*, n.d.):

- Incrementar el progreso de perforación
- Vida extendida de la broca
- Reducir las torceduras y los grumos de las brocas
- Evitar pega debido a la diferencia de presión
- Mejorar el enjarre
- Aumentar la lubricidad de la broca

Los principales tipos de sistemas base agua son:

- No dispersos
  - Dispersos
  - Calados
  - Salinos
- 
- **Lodos no dispersos:** Tipo de fluido se utiliza para perforar pozos poco profundos o la primera sección de los pozos, no contiene aditivos químicos para controlar las propiedades del lodo. Se les conoce como lodos primarios, su composición básica es agua, bentonita e hidróxido de calcio. Este tipo de lodo soporta altas temperaturas y no se utiliza en arcillas sensibles por su grado de afección (Villarroel & Izurieta, 2014).
  - **Lodos dispersos:** Este tipo de lodos se utiliza para perforar a grandes profundidades, contienen adelgazantes químicos y su composición básica es de agua, bentonita sódica y agentes dispersantes (lignosulfatos y lignitos) de bajas concentraciones. El pH está en el rango 8.5 y 10.5. Su característica principal es alta resistencia a la temperatura (Villarroel & Izurieta, 2014).

- **Lodos Calados:** Este fluido se utiliza para controlar pozos de gas y se compone de cal apagada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y yeso en altas concentraciones (Villarroel & Izurieta, 2014).
- **Lodos Salinos:** Este tipo de lodos se utiliza para perforar formaciones salinas o afectadas por agua dulce. Se compone de agua salada, arcilla y atalpulguita (Villarroel & Izurieta, 2014).

### 1.2.2 Lodos Base aceite

Es aquella mezcla en la cual al aceite se le agrega productos químicos orgánicos, el porcentaje de agua que puede contener este tipo de fluido es del 1 a 5 %; o un porcentaje mayor al 5% hasta 40% de agua con el objetivo de dispersar o emulsificar el aceite (*Perforaciones Tartagal- Salta: Tipos de Lodos de Perforación*, n.d.).

Este fluido es termoestable, libre de contaminación química y puede ser densificado después de ajustar la relación aceite-agua. Los sistemas base aceite son (Villarroel & Izurieta, 2014):

- Base Diésel
- Emulsión inversa
- Base Aceite (100%)
- Alto contenido de agua

### 1.3 Composición de los Fluidos de Perforación

Los lodos se componen de dos fases, la primera es la fase líquida o también denominada continua que puede ser el agua (dulce o salada) y fase sólida o dispersa que puede estar compuesta de sólidos inertes (deseables o indeseable) o sólidos reactivos (Villarroel & Izurieta, 2014).

#### 1.3.1 Aditivos de los Fluidos de Perforación

Se utilizan diferentes concentraciones de aditivos químicos para la formulación de fluidos base agua o aceite, cada una de los cuales dependerá de la sección a perforar. Para la formulación química se utilizan materiales o aditivos que son parte integral de los fluidos y cumplen las siguientes funciones (Villarroel & Izurieta, 2014):

- Densificar
- Viscosificar
- Controlar el filtrado o pérdida de agua
- Controlar reología
- Controlar pH
- Controlar pérdida de circulación
- Lubricar
- Modificar tensión interfacial
- Remover sólidos
- Estabilizar lutitas
- Evitar la corrosión
- Controlar bacterias y hongos
- Precipitar contaminantes

Para el caso de estudio a continuación, se enumera el material químico a utilizar con su respectiva función:

**Tabla 1** Aditivos utilizados normalmente en la sección intermedia.

Nombre Funcional	Función
Carbonato de Calcio 100	Agente de Puenteo
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	Viscosificante y control de filtrado
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	Viscosificante y control de filtrado
Barita	Densificante
Glycol	Estabilizador de Arcillas
Asfalto Líquido	Estabilizador de Arcillas
Goma Xántica	Viscosificante
Lubricante	Reductor de Fricción
Asfalto Sulfonado	Estabilizador de Lutitas

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021).

## **1.4 Funciones de los Fluidos de Perforación**

Los fluidos de perforación deben cumplir con funciones específicas para que la perforación del pozo sea rápida y segura. Sus funciones son variadas debido a que dependen de la sección a perforar (cambio en la litología). A continuación, se describen las funciones de los fluidos de perforación (PDVSA, 2002):

### **1.4.1 Capacidad de transporte (ripios de perforación a superficie)**

Al perforar una sección se generan cortes los cuales pueden ser pedazos de la formación, los cortes de perforación generados deben ser transportados a superficie mediante la circulación de fluido de perforación con la capacidad de vencer las pérdidas de presión acumuladas, asociadas con el equipo superficial, sarta de perforación, broca y anular (API, 2001). Esto significa que la circulación o velocidad anular, junto con la densidad, la viscosidad y el límite elástico, mantienen los pozos limpios y facilitan la operación, ya que los fluidos deben bombearse a la presión y el volumen necesarios para cada pozo (PDVSA, 2002).

### **1.4.2 Enfriar y lubricar la broca**

El calor se genera debido a la fricción mecánica ente la broca y la formación, así como en zonas donde la sarta de perforación roza contra el revestimiento. El fluido de perforación ayuda a enfriar la broca y la sarta de perforación al eliminar el calor del punto de acceso y disiparlo por todo el pozo. El propio fluido actúa como lubricante, reduciendo el calor por fricción (PDVSA, 2002).

### **1.4.3 Formar revoque/costra de lodo adecuada**

Las paredes del hoyo deben cubrirse con una costra lisa, delgada, flexible e impermeable para minimizar el colapso de la tubería y los problemas de adherencia. Las características del fluido de perforación, es decir, la concentración de cada aditivo y la dispersión de las partículas de arcilla, determinan el espesor del revoque (PDVSA, 2002).

### **1.4.4 Controlar la presión de la formación**

La presión ejercida por la columna de lodo se utiliza para contrarrestar el aumento de la presión de formación, de lo contrario, el fluido de formación puede ingresar al pozo y

perder el control del mismo. La presión ejercida por el lodo no debe exceder la presión de rotura de la propia roca. De lo contrario, el fluido de perforación ingresará a los estratos, lo que se denomina pérdida de circulación. La presión hidrostática está en función de la densidad y la altura vertical y es independiente de la geometría del pozo y ayuda a prevenir el flujo hacia el pozo (PDVSA, 2002).

#### **1.4.5 Capacidad de suspensión**

El fluido de perforación debe ser capaz de retener el material de los recortes de perforación y material densificante a medida que se retira el flujo ascendente de corriente y cae al fondo del pozo y detiene la circulación (API, 2001).

Esta característica se logra gracias a la propiedad tixotrópica, bajo condiciones estáticas la fuerza de gel debe evitar que el material densificante se precipite en los fluidos más pesados. Es cierto que la tixotropía frena la caída de un sólido, pero no la impide (PDVSA, 2002).

#### **1.4.6 Estabilidad**

La estabilidad del pozo depende de un equilibrio entre los factores mecánicos (presión y tensión) y factores químicos. Además, la composición química y propiedades de los fluidos de perforación deben estar ligados para asegurar la estabilidad del pozo hasta que se introduzca y cimente la tubería de revestimiento. El peso del lodo debe estar dentro del rango necesario para lograr un equilibrio entre las fuerzas mecánicas que actúan sobre el pozo, es decir, la presión del yacimiento, la dirección y la estructura (PDVSA, 2002).

#### **1.4.7 Minimizar el daño de la formación**

Los daños a la formación pueden ser determinados a partir de una comparación entre los datos de referencia de un pozo con los análisis de los núcleos de la formación para determinar la permeabilidad de retorno. Para minimizar el daño de la formación se debe diseñar fluidos de perforación y/o utilizar fluidos de rehabilitación en caso de existir dicho problema con la combinación adecuada de productos especiales que permitan controlar este inconveniente (API, 2001).

#### **1.4.8 Transmitir potencia hidráulica a la sarta de perforación**

El fluido de perforación es el medio que transfiere energía desde la superficie hasta el fondo del pozo y alimenta las herramientas de dirección del fondo de pozo. La hidráulica relaciona los efectos de la viscosidad, el flujo y la presión de circulación con el comportamiento de los fluidos de perforación (PDVSA, 2002).

#### **1.4.9 Controlar la corrosión en la sarta de perforación**

La corrosión ocurre por el contacto del fluido de perforación con los componentes de la tubería, la aireación del fluido de perforación, la formación de burbujas y otras condiciones de oclusión de oxígeno que causan este tipo de daño. Para determinar el grado de daño causado por la corrosión en la tubería, es necesario monitorear la operación (PDVSA, 2002). Existen productos especiales que son añadidos al lodo para controlar la alcalinidad de fluido, ajustar el pH como lo es la soda cáustica; de tal manera que no afecte significativamente otras funciones y propiedades del lodo.

#### **1.4.10 Minimizar el impacto ambiental**

El fluido de perforación se convierte en desecho cuando una operación se termina, por lo tanto, debe desecharse de acuerdo a las normas medioambientales reglamentarias (API, 2001).

### **1.5 Propiedades de los Fluidos de Perforación**

Según el Instituto Americano del Petróleo, las propiedades de los fluidos de perforación son aquellas características que debe poseer el fluido para contrarrestar los efectos negativos de la contaminantes aportados durante el proceso de punzonado, conservando al mismo tiempo sus características propias para soportar las condiciones de operación; se clasifican en (PDVSA, 2002):

#### **1.5.1 Propiedades físicas**

##### **1.5.1.1 Densidad**

La densidad es una de las características clave de los fluidos de perforación, también conocida como peso de lodo. Su función es proveer suficiente presión hidrostática para mantener el fluido de formación en su lugar (PDVSA, 2002). Su valor no debe ser

demasiado alto para evitar la ruptura de la formación, depende del gradiente de presión, y puede ir de 1.07 a 2.50 gr/cm<sup>3</sup> (Guerra, 2016).

En el laboratorio, para determinar la densidad del lodo se utiliza una balanza atmosférica como se presenta en la Figura 2. A continuación se describe el procedimiento para determinar el valor experimental (PDVSA, 2002):

1. Llene y cubra el recipiente con líquido y elimine el exceso de líquido del orificio que sale por la tapa del recipiente.
2. Cubra el orificio con el dedo.
3. Colocar la balanza sobre el soporte previo a una limpieza de la misma.
4. Con el indicador de la balanza encontrar el balance moviéndolo a lo largo de la balanza.
5. Leer el valor de la densidad del fluido.



**Figura 2** Balanza de Lodo (medición de la densidad).

**Fuente:** (Laboratorio Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

### 1.5.1.2 Reología

La reología es la ciencia de la deformación de un material (si es un sólido) o flujo (si es un líquido) bajo la acción de un esfuerzo aplicado. Para los fluidos de perforación, la reología es el estudio de las propiedades que determinan la fluidez y las propiedades gelificantes durante las operaciones de perforación (Hernandez & Manrique, 2018). El estudio de la reología del fluido requiere del análisis de las siguientes propiedades:

- Viscosidad de embudo
- Viscosidad Plástica [PV]
- Viscosidad Aparente [AV]
- Punto Cedente o Yield Point [YP]

- Tixotropía y esfuerzo de gel

### 1.5.1.3 Viscosidad de embudo

Para determinar esta propiedad se utiliza el Embudo Marsh, primero se calibra midiendo la viscosidad del agua (26 segundos/cuarto). El líquido pasa a través de un tamiz para retener las partículas sólidas en el tanque de almacenamiento. Las mediciones de succión y de tiempo se realiza en una jarra de lodo graduada de un cuarto de galón (PDVSA, 2002).

Para la determinación de la viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto cedente y tixotropía en el laboratorio se emplea un viscosímetro rotativo (PDVSA, 2002). La Figura 3 muestra el viscosímetro utilizado para el análisis de las propiedades reológicas mencionadas.

El procedimiento se la realiza de la siguiente manera (PDVSA, 2002):

1. Se llena con fluido un pequeño recipiente que viene en el equipo.
2. Se procede a encender el equipo y se coloca la perilla en 600 rpm.
3. Se debe registrar su lectura cuando el dial se mantenga constante.
4. Luego se procede a registrar las lecturas de 300 rpm, 200 rpm, 100 rpm, 6 rpm y 3 rpm.



**Figura 3** Viscosímetro rotativo

**Fuente:** (Laboratorio Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

A continuación, se estudia a cada propiedad reológica:

#### 1.5.1.4 Viscosidad Plástica

Este tipo de viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos que están presentes en el fluido. Los sólidos presentes se controlan a partir de equipos mecánicos de control de sólidos siendo indispensable para mejorar el comportamiento reológico del fluido y sobre todo para obtener altas tasas de penetración (PDVSA, 2002).

La fórmula para calcular la viscosidad plástica es la siguiente (API, 2001):

$$PV[cp] = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (1)$$

**Ecuación 1.** Ecuación para obtener la viscosidad plástica.

**Fuente:** ((PDVSA, 2002))

Donde:

$\theta_{600}$ : es la viscosidad medida del viscosímetro a 600 RPM (revoluciones por minuto).

$\theta_{300}$ : es la viscosidad medida del viscosímetro a 300 RPM (revoluciones por minuto).

#### 1.5.1.5 Viscosidad Aparente [AV]

Es una medida aparente de la resistencia al flujo de fluidos debido a los efectos adhesivos y cohesivos de las fuerzas gravitatorias entre las partículas y su comportamiento en la suspensión del fluido de perforación (PDVSA, 2002).

La viscosidad aparente [AV] está en función de la indicación del viscosímetro de lodo a 300 RPM ( $\theta_{300}$ ) o de la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM ( $\theta_{600}$ ). La fórmula para calcular la viscosidad aparente es la siguiente (API, 2001):

$$AV = \frac{\theta_{600}}{2} = \theta_{300} [cp] \quad (2)$$

**Ecuación 2.** Ecuación para obtener la viscosidad aparente.

**Fuente:** ((PDVSA, 2002))

Donde:

$\theta_{300}$ : es la viscosidad medida del viscosímetro a 300 RPM (revoluciones por minuto).

$\theta_{600}$ : es la viscosidad medida del viscosímetro a 600 RPM (revoluciones por minuto).

#### 1.5.1.6 Punto Cedente o Yield Point [YP]

Es la resistencia inicial al flujo causada por fuerzas electromagnéticas entre las partículas. Estas fuerzas electromagnéticas son causadas por cargas en la superficie de partículas dispersas en la fase líquida. El punto cedente es una medida de estas fuerzas en condiciones de flujo y depende de las características superficiales de los sólidos contenidos en la suspensión (Guerra, 2016) .

Esta medida se mide en lb/100 ft<sup>2</sup> y se calcula con la ecuación 3 (API, 2001):

$$YP = \theta_{300} - PV \quad (3)$$

**Ecuación 3.** Ecuación para obtener el punto cedente.

**Fuente:** ((PDVSA, 2002))

Donde:

$\theta_{300}$ : es la viscosidad medida del viscosímetro a 300 RPM (revoluciones por minuto).

VP: Viscosidad Plástica

#### 1.5.1.7 Tixotropía y Esfuerzo de Gel

Es una medida de las fuerzas de atracción físicas y electroquímicas en condiciones estáticas y está relacionada con la capacidad de suspensión de un líquido, controlada de manera similar al punto cedente (PDVSA, 2002).

Las medidas típicas para esta propiedad son a los 10 segundos y a los 10 minutos, pero se puede medir cualquier período de tiempo deseado (PDVSA, 2002). La fuerza debe ser lo suficientemente baja para permitir que los sólidos se asienten en los tanques de superficie y trampas de arena, garantizar un buen rendimiento de bombeo y tasas de recirculación suficientes y minimizar la acción de la bomba cuando se retira la tubería y para permitir la liberación de gases de contención en el líquido y facilitar el trabajo del desgasificador (PDVSA, 2002).

### 1.5.1.8 Filtrado API

Es la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque a las formaciones permeables, esta característica es afectada por la presión, temperatura, dispersión y tiempo. (PDVSA, 2002)

En el laboratorio se utiliza una prensa de filtrado como se observa en la Figura 4, el objetivo de esta prueba es determinar el volumen de fluido que pasa a la formación permeable cuando el fluido es sometido a una presión diferencial (PDVSA, 2002). El filtrado API se corre a temperatura ambiente durante 30 minutos y a 100 psi de presión diferencial. (PDVSA, 2002)

El procedimiento a seguir para este tipo de prueba es el siguiente (PDVSA, 2002):

1. Acoplar las partes del equipo limpias y secas con la siguiente secuencia: Tapa base, empaque de caucho, malla, hoja de papel filtro, empaque de caucho y celda.
2. Poner una muestra de lodo recién mezclado en la celda hasta 1/4 de pulgada por debajo de la parte superior.
3. Comprobar que la tapa superior tenga el empaque y esta se encuentre bien posicionada.
4. Fijar la tapa superior a la celda y asegurarla con el tornillo T.
5. Poner una probeta graduada bajo el tubo de salida del filtrado.
6. Colocar el cartucho de CO<sub>2</sub> en el porta-cartucho y apretar, no forzar.
7. Aplicar 100 psi de presión a la celda y filtrar por 30 minutos.

Nota: Al transcurrir los 30 minutos de la prueba, retirar la presión por la válvula de alivio y registrar el volumen recolectado en cm<sup>3</sup>.

8. Reportar el volumen recolectado como pérdida de filtrado API.
9. Desmontar la celda y verificar el espesor del revoque en términos de dureza, resistencia, flexibilidad, delgadez, firmeza, y verificar que tan esponjoso resulta el mismo. El espesor se expresa en 1/32". Se considera un espesor aceptable de 2/32".



**Figura 4** Prensa de filtrado API (determinación del filtrado API).

**Fuente:** (Laboratorio Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

#### 1.5.1.9 Potencial de Hidrogeno PH

La principal función de esta propiedad es indicar si el lodo es ácido o básico (PDVSA, 2002). En el laboratorio, para determinar su valor se utiliza un equipo llamado Ph-metro, el cual permite calcular el pH de las soluciones acuosas midiendo el electro potencial que se genera entre el electrodo de vidrio y e electrodo de referencia (PDVSA, 2002).

Para este trabajo se utilizó el ph-metro digital; para esta prueba se debe calibrar con tres soluciones Buffer con pH de 4, 7 y 10 respectivamente. En un vaso colocar la solución Buffer calibrada a pH 7.0, sumergir el electrodo en la solución. Esperar la estabilización de la lectura y ajustar el pH-metro a 7.0 como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5** pH-metro digital (determinación del pH)

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

#### **1.5.1.10 Contenido de Arena**

Nos indica el porcentaje de arena que tiene el lodo, la arena es completamente abrasiva lo que ocasiona daños significativos en las camisas de las bombas de lodo. (PDVSA, 2002)

### **1.5.2 Propiedades Químicas**

#### **1.5.2.1 Alcalinidad**

Esta propiedad se puede definir como la concentración iónica de un ácido neutro disuelto en agua (PDVSA, 2002).

#### **1.5.2.2 Dureza**

Se determina mediante un proceso de titulación y es producido por sales de calcio y magnesio disueltas en el agua o en el filtrado del lodo (Guerra, 2016). El calcio por lo general es un contaminante de los fluidos de base agua (PDVSA, 2002).

#### **1.5.2.3 Cloruros**

Esta es la cantidad de iones cloruro presentes en el filtrado de lodo, las altas concentraciones pueden afectar negativamente a los fluidos a base de agua (PDVSA, 2002).

#### **1.5.2.4 MBT (Methylene Blue Test)**

Es la concentración total de sólidos de arcilla que contiene el lodo, cuyo valor depende de la cantidad de azul de metileno que absorbe el fluido (PDVSA, 2002).

### **1.6 Fluido de Perforación Natflex**

El fluido de perforación "NATFLEX", es un fluido ecológico y amigable con el ambiente, mismo que busca cumplir con todas las funciones y rendimiento óptimo operacional, durante la etapa de perforación.

El fluido incorpora aditivos naturales que deben minimizar los problemas de estabilidad del hoyo y tiempos no productivos.

A continuación, se presenta una descripción de cada aditivo ecológico a utilizar:

### 1.6.1.1 Aditivos Ecológicos

A continuación, se presenta una descripción de cada aditivo ecológico a utilizar en la sección 12.25 pulgadas.

#### 1.6.1.2 Rheomax

Rheomax es un sistema coloidal estabilizado a pH alcalino, con la finalidad de mantener uniformidad química en su contenido. Es el resultado de varias pruebas de laboratorio de aplicación en la perforación minera, en el que se ha evidenciado, que en calidad de aditivo de fluido minero mejora la lubricidad, estabilidad de pared de pozo y maximiza la tasa de penetración (*Rheomax® DR High Performance*, n.d.)



**Figura 6** Aditivo Ecológico Rheomax

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

Desde el punto de vista químico, Rheomax está compuesto por partículas coloidales de óxido de sílice estabilizado y dispersado en medio acuoso alcalino, por lo que su aplicación incide positivamente en la lubricidad del lodo, mejora de la reología del sistema y a la vez reemplaza la utilización de un porcentaje de goma xanthan y controladores de filtrado, entre los que podemos mencionar al almidón, celulosas poli-aniónicas. Otro beneficio adicional de Rheomax es aportar al mejor rendimiento en la remoción de sólidos finos arcillosos indeseables en el fluido de perforación. (*La Química Como Aliada Para Aumentar La Recuperación Del Agua Dentro de Una Gestión Eficiente y Sostenible de La Minería*, n.d.)

Rheomax es compatible con las exigencias del ambiente, puesto que su naturaleza mineral se asocia con la composición de los suelos agrícolas. Rheomax también puede ser empleado como aditivo de rejuvenecimiento de las plantas y mejorador de la calidad de los frutos (*La Química Como Aliada Para Aumentar La Recuperación Del Agua Dentro de Una Gestión Eficiente y Sostenible de La Minería*, n.d.).

### 1.6.1.3 Almidón Yuca

El almidón de yuca es un polvo fino que se extrae del rallado de la yuca, el cual sirve como alimento y reemplaza la dieta de carbohidratos del ser humano. Con fines industriales el almidón de yuca se ha pregelatinizado y ha sido empleado como aditivo de fluidos de perforación de pozos en minería y en petróleo, en calidad de controlador de filtrado (González et al., 2012). El almidón de yuca es un polisacárido compuesto fundamentalmente por amilosa y amiopectina, las cuales pueden ser biodegradadas para disposición final, toda vez que su composición química sirve de alimento bacteriano y fomenta la biorremediación de los cortes de perforación (González et al., 2012).



**Figura 7** Aditivo Ecológico Almidón de Yuca

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

#### 1.6.1.4 Bioasfalto

El Bioasfalto básicamente está compuesto de resinas y aceites de alto peso molecular de origen vegetal y animal, soportados sobre nanoarcillas que facilitan la función de adherencia y sello en las secciones de lutitas y zonas de alta permeabilidad. Desarrolla sinergia funcional con el resto de aditivos del fluido de perforación (*Con Aceite de Palma Producen Bioasfalto*, n.d.). Su origen biológico hace factible su fácil degradación una vez que ha sido concluida la perforación. Es alimento para bacterias biorremediadores de cortes de perforación (Leite, n.d.).



**Figura 8** Aditivo Ecológico Bioasfalto

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

#### 1.6.1.5 Lubridrill

Lubridrill es un aditivo de origen vegetal compuesto por ácidos grasos insaturados tipo oleína, estearina, mismos que aportan a un índice de yodo del orden de los 60. Se compone de un sistema antifreezing que garantiza su dispersión en el sistema base agua y a la vez transmite la lubricidad al fluido de perforación. Concentraciones de Lubridrill del 1% son ya una garantía de reducción de un alto torque y arrastre presentes en las operaciones de perforación (Liu et al., 2019).



**Figura 9** Aditivo Ecológico Lubridrill

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

### 1.7 Litología de la Zona Intermedia

En la sección de 12.25 pulgadas de acuerdo a la columna estratigráfica de la cuenca oriente se atraviesan las formaciones Orteguzza, Tiyuyacu y Tena, estas formaciones están compuestas de lutita, arcillolita, limolita, conglomerados, arenisca, caliza y material volcánico.

- **Formación Orteguzza**

Está compuesta por areniscas de colores oscuros y lutitas gris verdosas a negras. Su composición no calcárea y la presencia de nódulos piríticos indican que se encuentran en un ambiente reductor. Teniendo algunos espesores de areniscas glauconíticas, cuyo tamaño de grano varía hasta formar areniscas conglomeráticas (Baby et al., 2014).

- **Formación Tiyuyacu**

Esta formación tiene mezclas de areniscas de colores claros de grano fino y suelto, arcillolitas de colores más oscuros de buena porosidad y conglomerados (Baby et al., 2014).

- **Formación Tena**

En esta formación se observa un cambio de facies de diferentes ambientes. En esta formación sobreyace la formación Tiyuyacu cuya edad se encuentra entre el Paleoceno Superior a Eoceno Inferior (Baby et al., 2014).

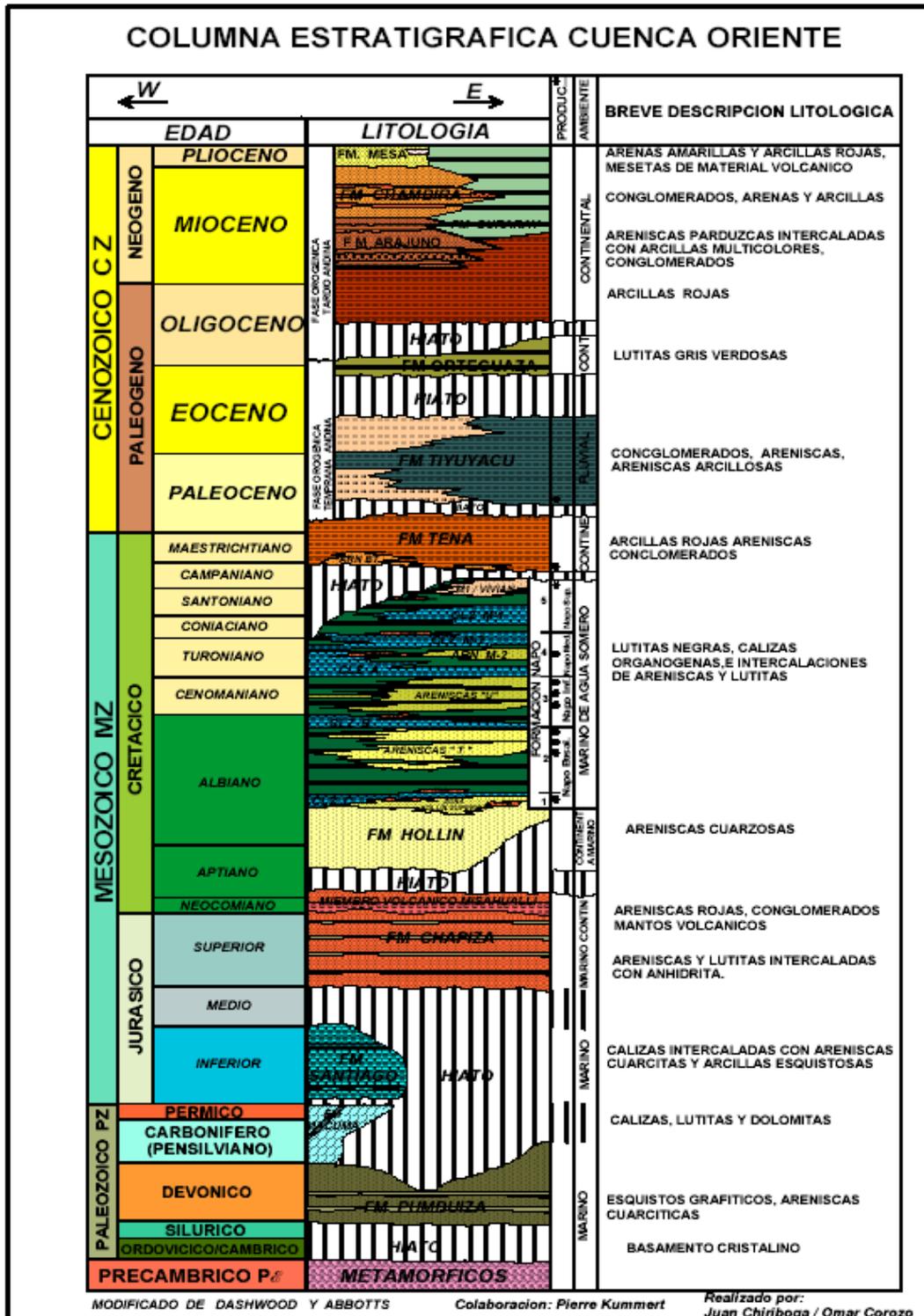


Figura 10 Columna Estratigráfica de la Cuenca Oriente

Fuente: (Baby et al., 2014).

## CAPÍTULO 2

# METODOLOGÍA

En este capítulo se describe las etapas para la elaboración y posterior selección del fluido de perforación Natflex.

### 2.1. Diseño del Fluido de perforación base

De acuerdo a lo mencionado en el Capítulo 1, cada sección a perforar utiliza un fluido específico ya que la litología cambia al pasar de zona a zona. Para el presente trabajo de titulación se diseñó un fluido base agua para el cual se usa como antecedente un programa de lodos realizado para la sección de interés.

El objetivo de esta zona es perforar la sección intermedia hasta una profundidad de 8.422 pies, atravesando las formaciones Chalcana, Orteguzza, Tiyuyacu y Tena. La formulación del lodo de perforación se basa principalmente en la utilización de productos como el Carbonato de Calcio tipo A 100, Celulosa Polianiónica Polimérica (PAC H y PAC L) y Goma Xántica.

El Carbonato de Calcio permite sellar la formación del conglomerado de forma apropiada, la concentración a manejar será de 10.0 – 15.0 lpb en todo el sistema de fluido. La Celulosa Polianiónica Polimérica (PAC H y PAC L) y Goma Xántica tienen la capacidad de acarreo y ajustan las propiedades de reología del sistema del lodo.

A medida que la perforación avanza, se requiere aumentar la densidad del lodo y mejorar la limpieza del hueco para ello se usa la barita. El lubricante cumple la función de lubricar y mejorar el ROP mientras se están atravesando las formaciones.

Para la sección intermedia también es importante mantener la presión diferencial que ejerce la columna hidrostática del fluido en contra de las paredes del hoyo en condiciones estáticas y dinámicas manteniendo la estabilización del mismo, es por ello que se utilizan productos estabilizadores de arcillas y hueco, en este caso son los aditivos poliméricos (glycol) y los asfaltos.

**Tabla 2** Aditivos y concentración requerida para la sección 12.25 pulgadas.

Producto	Función	Concentración [lpb]	
		Mínima	Máxima
Carbonato de Calcio 100	Agente de Punteo	10.00	15.00
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	Viscosificante y control de filtrado	1.00	2.00
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	Viscosificante y control de filtrado	1.00	2.00
Barita	Densificante	40.00	75.00
Glycol	Estabilizador de Arcillas	3.50	5.00
Asfalto Líquido	Estabilizador de Arcillas	2.00	3.50
Goma Xántica	Viscosificante	0.25	1.00
Lubricante	Reductor de Friccion	0.01	0.02
Asfalto Sulfonado	Estabilizador de Lutitas	2.00	3.50

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

## 2.2. Procedimiento de preparación del fluido de perforación en el laboratorio

El procedimiento adecuado para realizar la preparación del fluido de perforación en el laboratorio es el siguiente (PDVSA, 2002):

1. Se miden 350 mililitros de agua en una probeta y se los trasladan a un vaso de acero especial para mezclado. Se debe tener en cuenta el desplazamiento de los productos sólidos y líquidos para restarle al valor de 350 mililitros.
2. Se sitúa el vaso de acero con el agua en el agitador (Ver Figura 11).
3. Mientras se agita el agua, se procede a agregar el agente alcalino.
4. Se agregan productos solubles (Sales).
5. Se agregan agentes viscosificantes y reductores de filtrado, lentamente para evitar la formación de grumos y/u ojos de pescado.
6. Se añade a la mezcla el agente densificante a una velocidad un poco mayor que los agentes viscosificantes.

7. Se añaden el resto de productos requeridos para la formulación del fluido de perforación.
8. Se deja en agitación durante un tiempo no menor a 30 minutos con la finalidad de que la mezcla quede homogénea.



**Figura 11** Procedimiento para la preparación del lodo de perforación

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

**Nota:** Antes de iniciar la mezcla de los productos y/o agentes en laboratorio, se debe tener en cuenta que en el laboratorio un barril equivalente es igual a 350 mililitros, así mismo 1 libra equivale a 1 gramo, esto con la finalidad de transformar unidades de campo a unidades de laboratorio (PDVSA, 2002).

### 2.3. Elaboración del fluido de perforación base

Se elaboró cuatro muestras de fluidos de perforación, las cuales fueron sometidas a las diferentes pruebas de laboratorio; lo que difiere una muestra de otra son las concentraciones de los productos, la Tabla 3 muestra las concentraciones de cada producto utilizado para las cuatro muestras de lodo.

**Tabla 3** Formulación de las muestras de lodo base

Producto	Lodo Base 1 [lpb]	Lodo Base 2 [lpb]	Lodo Base 3 [lpb]	Lodo Base 4 [lpb]
Carbonato de Calcio 100	10.00	12.50	15.00	15.00
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	1.00	1.50	1.00	2.00
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	1.00	1.50	1	2
Barita	40.00	57.50	75.00	75.00
Glycol	3.50	4.25	3.5	5
Asfalto Líquido	2.00	2.75	3.5	3.5
Goma Xántica	0.25	0.63	1	1
Lubricante	3.50	5.25	7	7
Asfalto Sulfonado	2.00	2.75	3.5	3.5

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

### 2.4. Selección del fluido de perforación base

Una vez que las cuatro muestras del fluido de perforación fueron analizadas mediante pruebas físicas y químicas de laboratorio se procede a seleccionar una de ellas en base a una comparación con propiedades referenciales provenientes de un programa de lodos de la sección de interés.

La Tabla 4 presenta las propiedades referenciales, las cuales permitieron la selección del fluido de perforación base.

**Tabla 4** Propiedades referenciales para la sección 12.25 pulgadas

Propiedades	Valor		
	Unidades	Minímo	Máximo
Densidad del Lodo	lpg	9.6	10.5
Viscosidad Plástica, Vp @ 120° F	cp	12.00	25.00
Punto Cedente, Yp @ 120° F	lbf/100 ft2	15.00	26.00
Geles	lbf/100 ft2	4/12	8/19
Arena	%	<	12
pH	adimensiona	10.2	10.5
Filtrado API	cc/30 min	<	8

**Elaborado por:** Héctor Castellano

Esta etapa es la base para la elaboración del fluido de perforación Natflex objetivo principal del presente proyecto.

## 2.5. Diseño del Fluido de Perforación Natflex

El fluido de perforación Natflex se formuló a partir del fluido de perforación base, para su diseño se realizó el cambio de productos por aditivos ecológicos los cuales se mencionan en la Tabla 5. En el cambio prevalece la función de cada aditivo para que el fluido de perforación contenga la funcionalidad para la sección de interés.

**Tabla 5** Aditivos Ecológicos.

Producto	Función
Rheomax-Bentonita	Viscosificante
Almidón de Yuca	Control de Filtrado
Bioasfalto	Estabilizador de arcillas
Lubridrill	Lubricante y reductor de fricción

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

Los aditivos que contiene el fluido de perforación Natflex son los indicados en la Tabla 6.

**Tabla 6** Aditivos para la elaboración del Fluido de Perforación Natflex

<b>Nombre Funcional</b>	<b>Función</b>
Carbonato de Calcio 100	Agente de Puenteo
Almidón de Yuca	Control de filtrado
Celulosa Poli aniónica Polimérica Pac H	Viscosificante y control de filtrado
Rheomax-Bentonita	Viscosificante
Barita	Densificante
Bioasfalto	Estabilizador de Arcillas
Glycol	Estabilizador de Arcillas
Lubridrill	Reductor de Fricción

**Elaborado por:** Héctor Castellano

Se consideró el siguiente fundamento para la concentración de los aditivos del fluido de perforación Natflex, la cantidad de los aditivos ecológicos Rheomax-Bentonita, Almidón de Yuca y Pac H fueron determinados a partir de la concentración efectiva, la cual considera la comparación de los resultados de las pruebas de laboratorio de viscosidad y de filtrado API realizadas a Rheomax-Bentonita y Almidón de yuca – Pac H, respectivamente.

Para el caso del Bioasfalto y el Lubridrill son productos químicos que vienen con recomendación de fabricante de utilizar las mismas concentraciones a sus aditivos semejantes.

En resumen, solo cuatro aditivos se cambiaron por otros del tipo ecológico, los demás aditivos se mantienen porque son productos recomendados por ingenieros especializados que diseñan el programa de fluidos para la perforación de un pozo.

La elaboración del fluido de perforación Natflex considera el mismo esquema que se menciona en el punto 2.2. Se formuló dos muestras de fluidos de perforación Natflex (Ver Tabla 7), las cuales formaron parte del análisis técnico.

**Tabla 7** Concentraciones del Fluido de Perforación Natflex

<b>Producto</b>	<b>Natflex 1 [lpb]</b>	<b>Natflex 2 [lpb]</b>
Carbonato de Calcio 100	15,00	15,00
Almidón de Yuca	2.0	2.0
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	1.0	1.0
Rheomax-Bentonita	10.0-3.0	7.5-6.0
Barita	75,00	75,00
Bioasfalto	7.0	7.0
Glycol	3.5	3.5
Lubridrill	7.0	7.0

**Elaborado por:** Héctor Castellano

## **2.6. Análisis y Pruebas de Laboratorio del Fluido de Perforación**

Las pruebas de laboratorio que se realizan al fluido de perforación se mencionaron en la sección 1.4.1. A continuación, se describe el procedimiento que permite que el fluido de perforación este bajo condiciones de reservorio; esto es importante debido que en pruebas como el hinchamiento lineal e índice de productividad es necesario que el fluido este a parámetros de temperatura y presión de yacimiento.

### **2.6.1.1. Horno de rolado**

En esta prueba se utiliza el horno de rolado, este equipo es muy útil para determinar los efectos térmicos causados por los fluidos de perforación en circulación durante la perforación (PDVSA, 2002). El envejecimiento de los fluidos de perforación en recipientes a presión muestra efectos térmicos sobre la viscosidad y el comportamiento de varios aditivos cuando se exponen a altas temperaturas (Ver Figura 12).

Se lo utiliza para realizar muestras homogéneas de líquidos y sólidos y como horno de secado también. Su utilización se la realiza de la siguiente manera (PDVSA, 2002):

1. Se tiene listo el fluido a envejecer.

2. Se coloca el fluido en la celda de envejecimiento, se debe llenar hasta  $\frac{3}{4}$  de su capacidad volumétrica, con el fin de tener suficiente espacio para la expansión térmica del fluido y para evitar una presión interna excesiva.
3. Cerciorarse que las celdas de envejecimiento tengan instaladas sus correspondientes O-ring sobre el perímetro exterior, parte superior o fondo, para proteger los rodillos y reducir el ruido.
4. Colocar las celdas en el horno de rolado.
5. Fijar la temperatura de rolado, a 180° F. (temperatura a fondo de pozo).
6. Girar el interruptor con "HEAT" a la posición "ON".
7. Para comenzar a rolar, mueva el interruptor marcado "ROLL" a la posición "ON".
8. Después de 24 horas apagar el horno y cuando se enfrié, sacar las celdas de rolados utilizando guantes especiales.
9. Abrir las celdas y ejecutar las pruebas físicas y químicas para el fluido de perforación.



**Figura 12** Horno de Rolado

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

#### **2.6.1.2. Elaboración de Pastillas de formación**

Su principal objetivo es construir una pastilla de la formación seleccionada con el fin de someter a la misma a pruebas de inhibición y evaluar su efecto, para la elaboración de las pastillas es necesario tener claro diversos parámetros como la presión que necesito para que se forme la pastilla. Para la construcción de las pastillas nos vamos a basar de acuerdo con el manual de instrucciones del equipo y al ensayo hecho por (Alomoto & Torres, 2005) el cual nos dice:

1. Tener la formación seleccionada tamizada por malla #200.

2. Agregar a la formación agua destilada un porcentaje equivalente en peso de agua al 4%.
3. Remover suavemente en un mortero la muestra para que se humedezca de forma homogénea la formación.
4. Pasar la muestra por un tamiz de menor diámetro malla #100.
5. El valor de formación recuperado después de este proceso debe ser de 15 gramos.
6. Se procede con el ensamblaje de la celda de compactación del equipo.
7. Añadir cuidadosamente los 15 gramos de formación humedecida en la celda
8. Colocar correctamente la celda en el equipo de compactación en base al manual del usuario.
9. Generar con la bomba hidráulica del equipo una presión alrededor de 6000 psi y mantenerla por alrededor de 30 minutos que es el tiempo que se necesita para formar la pastilla.
10. En base al manual se debe despresurizar el equipo y finalmente recuperar las pastillas de formación que servirán para los diversos tipos de prueba que se requiera hacer.



**Figura 13** Proceso elaboración de pastilla de formación

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

### 2.6.1.3. Índice de Rendimiento

Se trata de un análisis de laboratorio utilizado para observar que tan bueno es el sistema inhibitorio de los lodos, para ello es necesario realizar un par de ensayos como calcular el porcentaje de hidratación e hinchamiento de los fluidos cuando está en contacto a condiciones estáticas de envejecimiento con las diferentes formaciones. Esto a su vez me permitirá finalmente determinar cuál es el índice de rendimiento que muestran los lodos. El método está basado en el trabajo de (Alomoto & Torres, 2005) el cual manifiesta el siguiente proceso:

1. Pesar en una balanza y medir las dimensiones de diámetro y altura de las pastillas de la formación seleccionada a condiciones iniciales.
2. Sumergir la pastilla en un vaso de precipitado con 200 cc de fluido de perforación.
3. Con cuidado introducir la muestra en el horno de rolado.
4. Cerrar el horno de rolado y envejecer la muestra estáticamente por un tiempo de 16 horas a una temperatura real durante la perforación 120°F.
5. Drenar el fluido de perforación con cuidado para recuperar las pastillas y remover el exceso de fluido que esta tenga.
6. Pesar y medir las dimensiones de diámetro y altura de las pastillas de la formación seleccionada a condiciones finales.
7. Determinar el índice de rendimiento del lodo con los parámetros de hidratación e hinchamiento.

Cálculos:

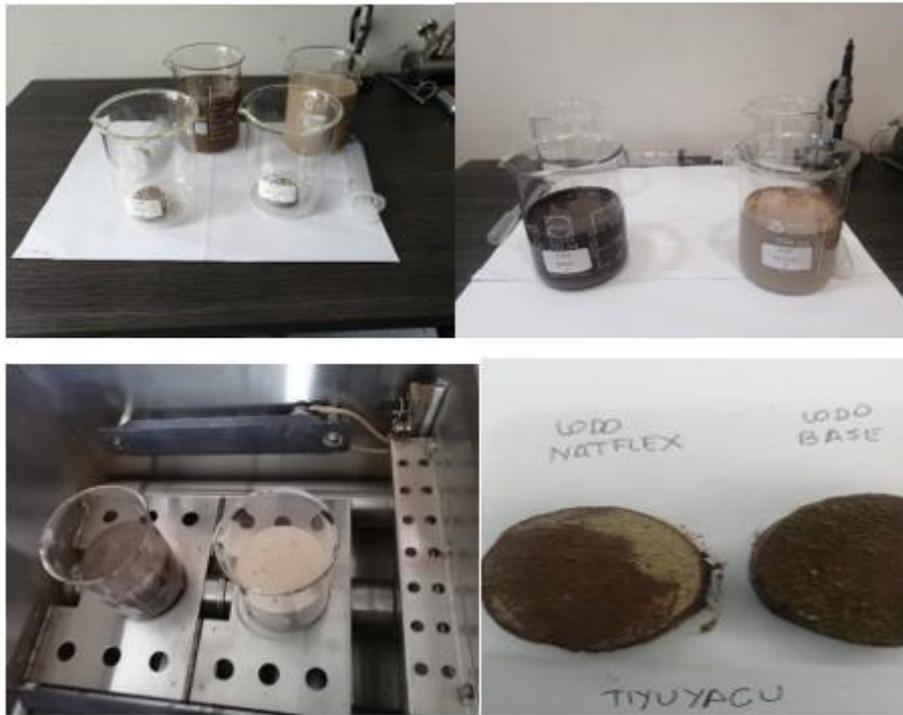
Porcentaje de hidratación en la pastilla, H:

$$\%H = \frac{100 * (\text{Peso final pastilla} - \text{Peso inicial pastilla})}{\text{Peso inicial pastilla}}$$

Porcentaje de hinchamiento en la pastilla, S:

$$\%S = \frac{100 * (\text{Volumen final pastilla} - \text{Volumen inicial pastilla})}{\text{Volumen inicial pastilla}}$$

Índice de rendimiento del sistema inhibitorio en el lodo, IR:



**Figura 14** Proceso índice de rendimiento

**Fuente:** (Laboratorio de Sólidos y Lodos Nacionales S.A., 2021)

## CAPÍTULO 3

### DATOS EXPERIMENTALES

#### 3.1. Resultados de las pruebas de laboratorio (fluido de perforación base)

A continuación, se presenta los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las cuatro muestras de fluido base:

- **Densidad del lodo**

La Tabla 8, presenta los resultados de densidad de cada muestra de lodo base, se observa que el lodo base 4 es el de mayor densidad respecto a las demás muestras.

**Tabla 8** Resultados de densidad para las cuatro muestras de lodo base

N° de Muestra	Unidades	Densidad
LODO BASE 1	ppg	8.80
LODO BASE 2	ppg	9.05
LODO BASE 3	ppg	9.72
LODO BASE 4	ppg	9.90

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Resultados de reología del fluido**

A continuación, se detallan las condiciones a utilizar para el viscosímetro rotativo (Viscosímetro Ofite 800) y temperatura de la prueba, T = 120 °F

La Tabla 9, muestra los resultados experimentales que se obtuvieron del viscosímetro rotativo para la determinación de la viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto cedente y esfuerzo de gel. Además, se presenta las lecturas dial a diferentes velocidades para cada una de las muestras de lodo base.

El lodo base 4, presenta mayor valor numérico en comparación con las otras muestras de lodo base.

**Tabla 9** Resultados reológicos y tixotrópicos de los fluidos de perforación base

Propiedad	Unidad	LODO BASE 1	LODO BASE 2	LODO BASE 3	LODO BASE 4	
Lecturas dial	600 rpm	-	31	69	65	141
	300 rpm	-	21	49	46	106.5
	200 rpm	-	17	40	39	91
	100 rpm	-	11	28	29	69.5
	60 rpm	-	8	22.5	23	56.5
	30 rpm	-	5.5	16	18	42
	6 rpm	-	2.5	8	10	22.5
	3 rpm	-	2	7	8	17.5
Viscosidad plástica [PV]	cp	10	20	19	34.5	
Punto Cedente [YP]	lb/100ft <sup>2</sup>	11	29	27	72	
Viscosidad Aparente [AV]	cp	15.5	34.5	32.5	70.5	
Geles	10 sec	lb/100ft <sup>2</sup>	2.5	7	8.5	17.5
	10 min	lb/100ft <sup>2</sup>	3	8.5	12	20

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Filtrado API**

La Tabla 10 contiene los resultados experimentales que se obtiene de la prensa de filtrado. El lodo base 1 tiene un espesor de costra de 1.5 mm, es el de menor valor numérico.

**Tabla 10** Resultados de filtrado API para las muestras de lodo base

Características	Unidades	LODO BASE 1	LODO BASE 2	LODO BASE 3	LODO BASE 4
Volumen filtrado	cc/30 min	6.2	5.9	5.7	4.5
Cake	mm	1.5	2.0	2.0	2.0
Color	---	café oscuro	café oscuro	café oscuro	café oscuro

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Contenido de Arena**

Los resultados experimentales para el contenido de arena se observan en la Tabla 11, el lodo base con mayor porcentaje de arena es el número cuatro.

**Tabla 11** Resultados del contenido de arena para las muestras de lodo base

N° de Muestra	Unidades	Arena
LODO BASE 1	%	2
LODO BASE 2	%	3.5
LODO BASE 3	%	4
LODO BASE 4	%	5

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **pH**

Los resultados experimentales para la determinación de pH se observan en la Tabla 12, el ph para el lodo número cuatro es de 10.6, presentando un ligero aumento en comparación con los demás.

**Tabla 12** Resultados de Ph para las muestras de lodo base

N° de Muestra	Unidades	Arena
LODO BASE 1	---	10.4
LODO BASE 2	---	10.5
LODO BASE 3	---	10.4
LODO BASE 4	---	10.6

**Elaborado por:** Héctor Castellano

### 3.2. Resultados de las pruebas de Laboratorio realizadas al Fluido Natflex

Como se mencionó en el Capítulo metodológico para la formulación del lodo Natflex fue necesario partir del Lodo Base 3 y considerar la concentración efectiva de los aditivos ecológicos para ello se realizó ensayos de concentración efectiva para la viscosidad y el filtrado (Ver Anexo 1 y 2).

- **Densidad del fluido Natflex**

La Tabla 13 presenta los resultados de densidad para los lodos Natflex elaborados, el lodo Natflex 1 es el de mayor valor numérico.

**Tabla 13** Resultados de densidad para los lodos Natflex

N° de Muestra	Unidades	Densidad
LODO NATFLEX 1	ppg	9.80
LODO NATFLEX 2	ppg	9.79

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Reología y Tixotropía del fluido Natflex**

La Tabla 14 muestra los resultados experimentales que se obtuvieron del viscosímetro rotativo para la determinación de la viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto cedente, esfuerzo de gel y las lecturas dial a diferentes velocidades. El lodo Natflex 1 posee medidas mayores en relación al Lodo Natflex 2.

**Tabla 14** Resultados reológicos y tixotrópicos del lodo Natflex

Propiedad	Unidad	LODO NATFLEX 1	LODO NATFLEX 2	
	600 rpm	-	79	64
	300 rpm	-	58	44
	200 rpm	-	48	36
Lecturas dial	100 rpm	-	36	26.5
	60 rpm	-	31.5	20
	30 rpm	-	26	16.5
	6 rpm	-	18	10.5
	3 rpm	-	17.5	10
Viscosidad Plástica [PV]	cp		21	20
Punto Cedente [YP]	lb/100ft <sup>2</sup>		37	24
Viscosidad Aparente [AV]	cp		39.5	32
Geles	10 sec	lb/100ft <sup>2</sup>	17	8
	10 min	lb/100ft <sup>2</sup>	35	22

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Filtrado API fluido Natflex**

La Tabla 15 contiene los resultados experimentales que se obtiene de la prensa de filtrado. El espesor de costra para cada lodo Natflex es el mismo, el volumen de filtrado difiere 0.05 mm del lodo Natflex 2.

**Tabla 15** Resultados numéricos de Filtrado API para los lodos Natflex

<b>Característica</b>	<b>Unidades</b>	<b>LODO NATFLEX 1</b>	<b>LODO NATFLEX 2</b>
Volumen filtrado	cc/30 min	5.25	5.3
Cake	mm	1.5	1.5
Color	---	café claro/resistente	café claro/resistente

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Contenido de Arena fluido Natflex**

Los resultados experimentales para el contenido de arena se observan en la Tabla 16, el lodo Natflex 1 posee 0.5% adicional de contenido de arena que el lodo Natflex 2.

**Tabla 16** Resultados numéricos de contenido de Arena para los lodos Natflex

<b>N° de Muestra</b>	<b>Unidades</b>	<b>Arena</b>
<b>LODO NATFLEX 1</b>	%	5.00
<b>LODO NATFLEX 2</b>	%	4.50

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **pH**

Los resultados experimentales para la determinación de pH se observan en la Tabla 17, se puede decir que el lodo Natflex 2, es un lodo básico por estar más cercano al valor extremo de basicidad de acuerdo a la escala de ph.

**Tabla 17** Resultados numéricos de pH para los lodos Natflex

N° de Muestra	Unidades	Arena
LODO NATFLEX 1	---	8.00
LODO NATFLEX 2	---	9.00

**Elaborado por:** Héctor Castellano

### 3.3. Resultados Experimentales del Análisis de Índice del Rendimiento.

- **Ensayo de Hidratación**

A continuación, se presenta la Tabla 18 que contiene los resultados del ensayo de hidratación. La Formación Tiyuyacu con lodo base supera los valores numéricos de peso inicial, peso final de la pastilla y porcentaje de hidratación en comparación con la formación Tiyuyacu con Lodo Natflex.

**Tabla 18** Resultados de ensayo de hidratación

Formación	Peso Inicial gr	Peso final pastilla húmeda gr	Porcentaje de hidratación %
Tiyuyaco con Lodo Base	14,90	19,90	33,56
Tiyuyaco con Lodo Natflex	14,70	19,00	29,25

**Elaborado por:** Héctor Castellano

### 3.4. Resultados experimentales del Ensayo de Hinchamiento

A continuación, se presenta la Tabla 19 que contiene los resultados de volumen de hinchamiento inicial y final, y porcentaje de hinchamiento de las pastillas, respectivamente.

**Tabla 19** Resultados de ensayo de hinchamiento

<b>Formación</b>	<b>Diámetro inicial mm</b>	<b>Altura inicial mm</b>	<b>Volumen inicial mm<sup>3</sup></b>
Tiyuyaco con Lodo Base	28,00	10,00	6157,52
Tiyuyaco con Lodo Natflex	28,00	10,00	6157,52

<b>Formación</b>	<b>Diámetro final mm</b>	<b>Altura final mm</b>	<b>Volumen final mm<sup>3</sup></b>
Tiyuyaco con Lodo Base	32,00	12,00	9650,97
Tiyuyaco con Lodo Natflex	31,00	11,00	8302,44

<b>Formación</b>	<b>Volumen inicial mm<sup>3</sup></b>	<b>Volumen final mm<sup>3</sup></b>	<b>Porcentaje de Hinchamiento %</b>
Tiyuyaco con Lodo Base	6157,52	9650,97	56,73
Tiyuyaco con Lodo Natflex	6157,52	8302,44	34,83

**Elaborado por:** Héctor Castellano

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Lodo de perforación base

Para seleccionar el lodo base de referencia se toma en cuenta el lodo que mejor se ajuste a los valores de las propiedades recomendadas en el capítulo 2. La Tabla 20 muestra un resumen de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas para cada una de las muestras de lodo.

**Tabla 20** Propiedades de lodos base para la sección 12.25 pulgadas

Propiedades	Unidades	Lodo Base 1	Lodo Base 2	Lodo Base 3	Lodo Base 4
Densidad del Lodo	lpg	8.80	9.05	9.72	9.90
Viscosidad Plástica, Vp @ 120° F	cP	10	20	19	34.5
Punto Cedente, Yp @ 120° F	lbf/100 ft2	11	29	27	72
Geles	lbf/100 ft2	2/2,5	7/8	8,5/12	16,5/19
Arena	%	2	3.5	4	5
pH	adimensional	10.5	10.5	10.5	10.5
Filtrado API	cc/30 min	6.2	5.9	5.7	4.5

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Densidad**

La densidad del lodo está entre los valores de 8.8 ppg y 9.9 ppg, valores que son adecuados para usarlos en la perforación de la sección de interés esto me permitirá mantener la presión hidrostática en la operación. De acuerdo con la tabla de valores referenciales (Ver Tabla 4), la densidad debe estar en el siguiente rango 9.5 ppg y 10.5 ppg. Los valores del lodo base 3 y lodo base 4 son 9.72 ppg y 9.90 ppg respectivamente.

- **Reología y Tixotropía**

Los valores de viscosidad plástica que sugiere el programa de fluidos varían entre 12 cp y 25 cp (Tabla 4). El lodo base 3 tiene un valor de 19 cp, valor que estaría dentro del rango estimado para esta propiedad.

Para la sección de 12.25 pulgadas se recomienda los valores del punto cedente y esfuerzo de gel. El lodo base 3 tiene un valor más cercano al rango establecido. Cuando se habla del esfuerzo de gel (Ver Tabla 20), queremos que cumpla la función de suspender los sólidos cuando la sarta de perforación se detiene, es por ello que los

lodos de perforación deben tener un valor adecuado de esfuerzo de gel. La tabla 20 muestra que el lodo base 3 cumple con lo sustentado anteriormente y será el seleccionado para esta propiedad ya que voy a tener la capacidad de acarreo y propiedades reológicas que necesito.

- **Filtrado API**

En la tabla 20 los valores de filtrado de las muestras de fluido están por debajo de los valores recomendados, es decir que todos pueden restringir la invasión de filtrado y muestran un buen revoque.

#### 4.2 Selección del Fluido de Perforación Base

Después de haber realizado el análisis de las propiedades para cada una de las formulaciones del lodo base, se puede notar que el fluido de perforación seleccionado es el lodo base 3 debido a que este presenta valores que mejor se ajustan a los rangos referenciales para nuestra sección de interés y de la misma forma pueden aportar a la estabilidad del hueco, ayudar a equilibrar las presiones, controlar el filtrado, etc.

La tabla 21 muestra los resultados de las pruebas de laboratorio de la muestra de lodo seleccionada (Lodo Base 3).

**Tabla 21** Propiedades experimentales del Lodo base 3

Propiedades	Unidades	Lodo Base 3
Densidad del Lodo	lpg	9.72
Viscosidad Plástica, Vp @ 120° F	cP	19
Punto Cedente, Yp @ 120° F	lbf/100 ft <sup>2</sup>	27
Geles	lbf/100 ft <sup>2</sup>	8,5/12
Arena	%	4
pH	adimensional	10.5
Filtrado API	cc/30 min	5.7

**Elaborado por:** Héctor Castellano

#### 4.3 Formulación y pruebas de laboratorio realizadas al fluido de perforación Natflex

Como se menciona en el capítulo de la metodología, antes de formular el fluido Natflex se debe encontrar las concentraciones efectivas de cada aditivo a utilizar para de esa

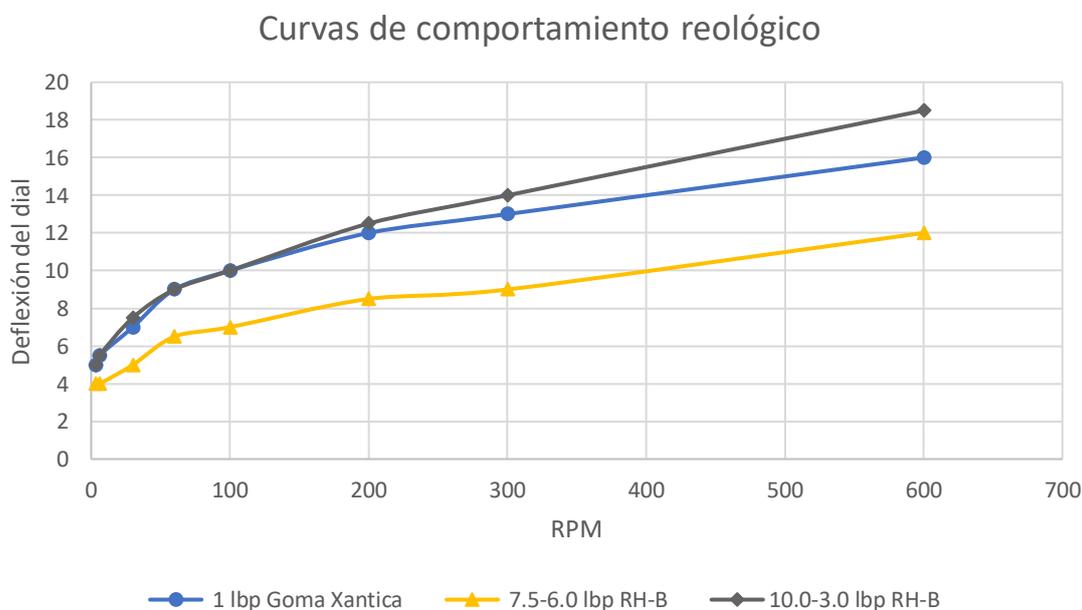
forma verificar que su comportamiento sea similar y pueda ajustarse a los valores referenciales de cada propiedad.

En primer lugar, se busca un valor adecuado al cual funcionen los aditivos, en otras palabras, llega un momento en el cual el aditivo se satura y ya no permite mejorar su función, esto quiere decir que, por más concentración del aditivo, el resultado no va a mejorar en términos de funcionalidad.

#### 4.3.1 Selección Sistema Rheomax-Bentonita

Para la selección del sistema se realizó el anexo 1, primero se formularon distintas concentraciones partiendo de un valor mínimo y máximo como se puede ver en el anexo. Los valores de reología fueron variando dependiendo las concentraciones que se formulaban, esto hacía que el comportamiento de los mismos sea variado. Una manera de ver el comportamiento reológico fue elaborar la Figura 21 del Anexo 2, donde se plotearon todas las curvas para finalmente escoger las que se comporten igual a la curva de referencia. Los sistemas seleccionados RHEOMAX-BENTONITA son 7.5-6 lbp y 10-3 lbp de.

La Figura 15 muestra el comportamiento de los sistemas seleccionados respecto al sistema de referencia.

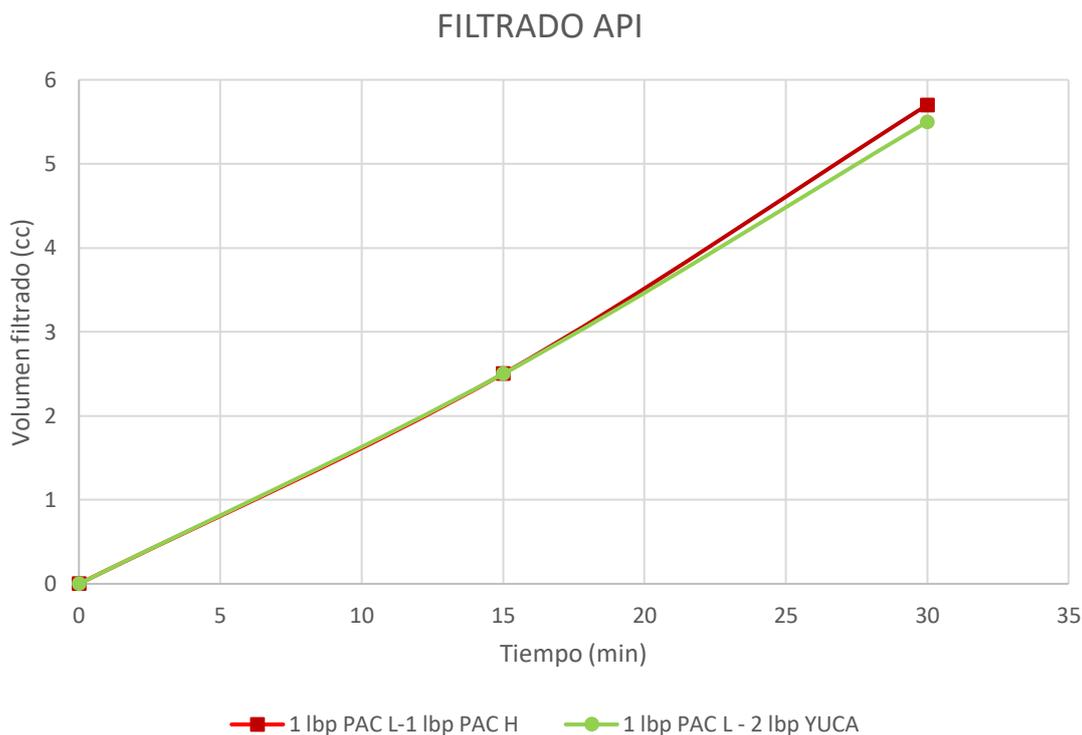


**Figura 15** Curva de comportamiento reológico (sistema seleccionado y referencial)

**Elaborado por:** Héctor Castellano

### 4.3.2 Selección sistema Almidón de Yuca – Pac H

Al igual que en el punto anterior el anexo 2 presenta los resultados de todas las muestras de cada sistema que se formuló con el fin de encontrar el sistema que más se ajuste al de referencia, en este caso el sistema de 2 lpb Almidón de Yuca – 1 lpb Pac H es el seleccionado con respecto al sistema 1 lpb PAC L – 1 lpb PAC H ya que demostraron tener casi las mismas características de control de filtrado y revoque. El gráfico 16 muestra la curva de filtrado del sistema seleccionado y el sistema de referencia.



**Figura 16** Curva de Filtrado sistema seleccionado y sistema referencial

**Elaborado por:** Héctor Castellano

### 4.3.3 Lodo de perforación Natflex

La siguiente tabla presenta un resumen de las propiedades analizadas por medio de las pruebas de laboratorio con las formulaciones de los lodos Natflex una vez que ya se encontraron las concentraciones efectivas de los sistemas.

**Tabla 22** Propiedades analizadas para los lodos Natflex

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Lodo Natflex 1</b>	<b>Lodo Natflex 2</b>
Densidad del Lodo	lpg	9.80	9.79
Viscosidad Plástica, Vp @ 120° F	cP	21	20
Punto Cedente, Yp @ 120° F	lbf/100 ft2	37	24
Geles	lbf/100 ft2	17/35	8/22
Arena	%	5	5
pH	adimensiona	9.0	9.0
Filtrado API	cc/30 min	5.25	5.3

**Elaborado por:** Héctor Castellano

- **Densidad**

La densidad de los lodos Natflex está entre 9.8 lpg y 9.79 lpg siendo este un valor adecuado para perforar la sección 12.25 pulgadas. Ambas formulaciones se ajustan a los valores de referencia del lodo base 3 seleccionado, esto es, debido a que para ambos casos estamos utilizando el mismo aditivo que cumple la función de proporcionar el peso al lodo.

- **Reología y Tixotropía**

Una vez realizada la prueba de reología a los fluidos Natflex 1 y Natflex 2, se pudo observar (Tabla 22) que el sistema Rheomax-Bentonita ayuda al lodo a comportarse de manera similar cuando utilizamos el aditivo Goma Xántica para la elaboración del lodo. Esto se puede evidenciar en los valores de Viscosidad Plástica, Punto Cedente y Geles.

- **Filtrado API**

El volumen de filtrado que muestra el lodo Natflex es menor al valor recomendado en el programa de fluidos, el almidón de yuca muestra tener un gran desempeño para controlar la invasión de filtrado y puede ser tomado en cuenta como aditivo.

Luego de haber hecho un breve análisis de las propiedades de los fluidos Natflex, el siguiente paso es seleccionar el fluido Natflex que presente valores más cercanos al lodo base 3 o referencial con el fin de realizar un último análisis comparativo. El lodo seleccionado en este caso es el fluido Natflex 2.

#### 4.4 Lodo Base vs Lodo Natflex

La siguiente tabla presenta un cuadro de resumen, el cual nos muestra los valores de cada propiedad una vez realizadas las pruebas de laboratorio.

**Tabla 23** Valores experimentales Lodo Base y Lodo Natflex 2

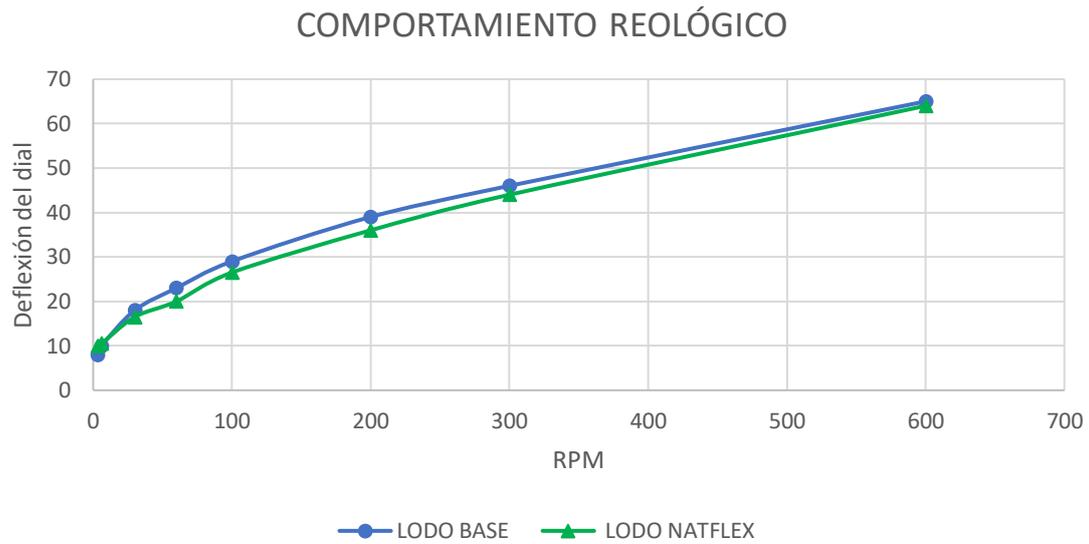
Propiedad	Unidades	Lodo Base	Lodo Natflex
Densidad del Lodo	lpg	9,72	9,79
Viscosidad Plástica, Vp @ 120° F	cP	19	20
Punto Cedente, Yp @ 120° F	lbf/100 ft2	27	24
Geles	lbf/100 ft2	8,5/12	8/22
Arena	%	4	5
pH	adimensional	10,5	9,0
Filtrado API	cc/30 min	5,7	5,3

**Elaborado por:** Héctor Castellano

Como se puede observar, el fluido base y el fluido Natflex tienen un comportamiento muy similar en cuanto a sus propiedades a pesar de no estar usando la misma formulación. Los aditivos ecológicos propuestos en este trabajo de titulación como son Rheomax, Almidón de Yuca, Bioasfalto y Lubridrill presentan características físicas (granulometría) y químicas (inhibición) que permiten elaborar un fluido de perforación.

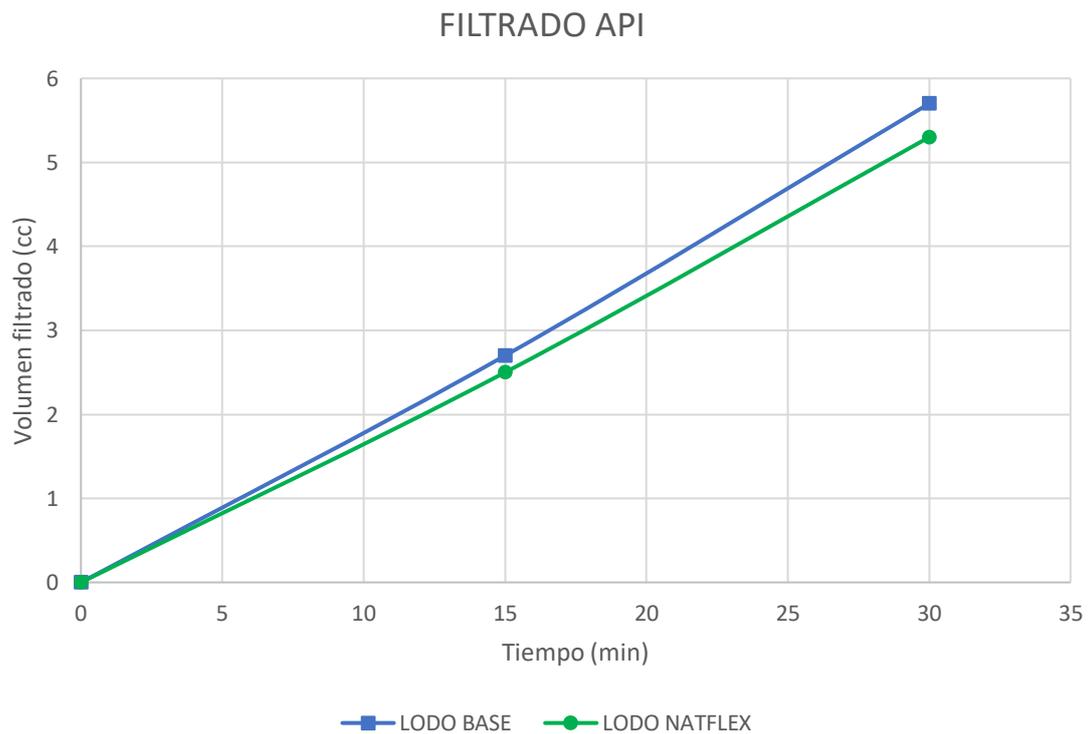
Una forma de evidenciarlo es por medio de los siguientes gráficos, los cuales analizan el comportamiento del lodo base con respecto al lodo Natflex. En la Figura 17, se puede observar que el modelo reológico de ambos es prácticamente el mismo usando el sistema Rheomax o Goma Xántica, mientras que en la Figura 18, la condición de control de filtrado muestra una leve reducción para el caso del fluido Natflex debido a la utilización del Almidón de Yuca como controlador de filtrado

Al ajustarse los valores de los lodos con respecto a los valores de las propiedades recomendadas por el programa de fluidos tomado como referencia para este trabajo experimental, se puede concluir que ambos fluidos pueden ser considerados una opción a tomar en cuenta para la perforación de la sección intermedia de 12,25 pulgadas.



**Figura 17** Comportamiento Reológico Lodo Base 3 vs Lodo Natflex 2

**Elaborado por:** Héctor Castellano



**Figura 18** Curva de Filtrado API Lodo Base 3 vs Lodo Natflex 2

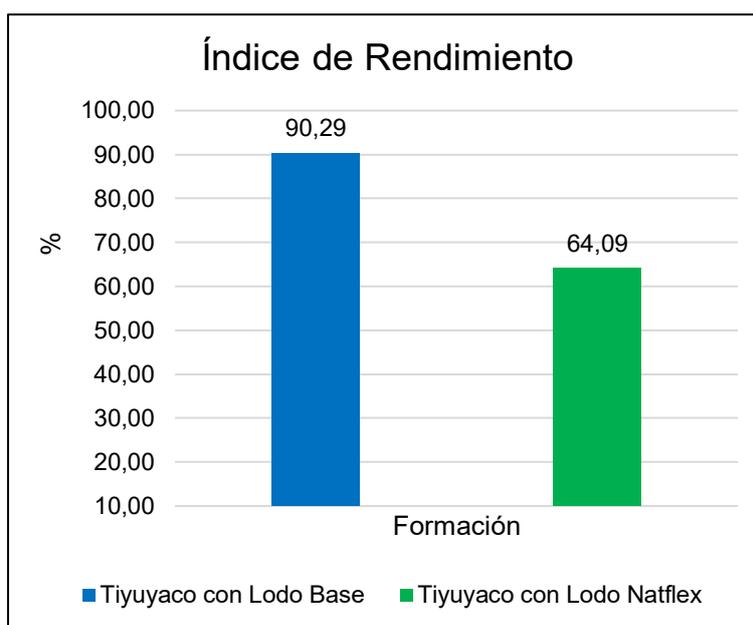
**Elaborado por:** Héctor Castellano

Por último, los resultados de la prueba de índice de rendimiento que presenta la tabla 24, nos indica que el fluido Natflex es un lodo que inhibe mejor la hidratación e hinchamiento de las arcillas, resultado que es favorable visto desde un punto técnico debido a que el que tiene menor porcentaje de índice de rendimiento es el que mejor inhibición tiene y por ende el riesgo de tener un problema por hinchamiento de arcillas y reducción de permeabilidad es menor.

**Tabla 24** Resultados de la prueba de índice de rendimiento

<b>Formación</b>	<b>Porcentaje Hidratación %</b>	<b>Porcentaje Hinchamiento %</b>	<b>Índice de Rendimiento %</b>
Tiyuyaco con Lodo Base	33,56	56,73	90,29
Tiyuyaco con Lodo Natflex	29,25	34,83	64,09

**Elaborado por:** Héctor Castellano



**Figura 19** Índice de rendimiento en porcentaje del Lodo Base y Lodo Natflex

**Elaborado por:** Héctor Castellano

## **CAPITULO 5**

### **ANALISIS ECONÓMICO**

En el área de fluidos de perforación se manejan diferentes esquemas o contratos para brindar determinados servicios: costo por producto, costo por pie, costo por lump sum. Por lo que a continuación se detalla cada tipo de contrato:

#### **5.1 Costo por Producto**

Como su nombre lo indica en este tipo de contrato la empresa de servicio cobrará o facturará a la empresa operadora el costo de cada producto usado o agregado al fluido de perforación (García, 2018).

En el área de fluidos de perforación se lleva un control de costos por sección del pozo, para después realizar un análisis comparativo entre pozos de un mismo PAD o campo, dependiendo de la similitud en cuanto a geometría y dificultad de los pozos perforados.

#### **5.2 Costo por Pie**

En este tipo de contrato la empresa prestadora de servicios llega a un acuerdo con la empresa operadora fijando una tarifa por cada pie perforado del pozo. En algunas ocasiones este valor se mantiene en un solo costo por pie para todas las secciones del pozo, o en otras se define un costo por pie distinto para cada sección.

Ambas empresas llegan a realizar algunas cláusulas dentro del contrato poniendo todos los puntos a realizar. Este costo se cuadra diariamente con las profundidades de apertura y cierre del reporte diario de perforación del pozo (realizado por el company man) (García, 2018).

#### **5.3 Costo por Lump Sum**

En este tipo de contrato las empresas a trabajar de igual forma llegan a fijar una tarifa en cuanto al total del fluido de perforación. No es muy habitual que se realice este tipo de contrato ya que dependería más bien de la empresa prestadora de servicios porque debe obtener una ganancia optimizando los productos utilizados en el fluido de perforación para no caer en pérdida al utilizar este tipo de contrato (García, 2018).

#### 5.4 Costo de Productos

Para el análisis económico de este proyecto se va a definir algunos costos por productos referenciales ya que estos varían dependiendo del lugar de fabricación, costos de transporte, importaciones, aduanas, entre otros (García, 2018). En la siguiente tabla se definen el costo de los productos:

**Tabla 25** Costo de cada producto químico

Producto	Costo por saco/galón (USD)
Carbonato de Calcio 100	10,23
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	116,11
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	107,91
Barita	13,95
Glycol	1369,10
Asfalto Líquido	120,00
Goma Xántica	180,48
Lubricante	814,31
Asfalto Sulfonado	108,52
Almidon de Yuca	120,00
Bentonita	18,00
Rheomax	85,00
Bioasfalto	60,00
Lubridrill	625,00

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021)

Una vez que se ha seleccionado la formulación adecuada del fluido de perforación para la sección de 12.25 pulgadas, el siguiente paso a considerar son los cálculos de las capacidades y volúmenes de los tanques, tubería y pozo.

Es sustancial realizar un cálculo correcto de estos valores ya que se debe considerar la eficiencia en cuanto a los volúmenes a preparar de fluido de perforación en los tanques del taladro, es decir, el volumen debe ser suficiente para llenar los tanques del sistema activo así como el pozo y de esta manera no tener inconvenientes en cuanto al funcionamiento de los equipos en superficie, así como mantener una columna de fluido

en el pozo que mantenga siempre la presión hidrostática en los valores que se necesita (García, 2018).

### 5.5 Volúmenes del Fluido para la Sección de 12,25 Pulgadas

Este volumen se mide generalmente en barriles, galones o metros cúbicos. Para el respectivo análisis se va a considerar la información del programa de fluidos.

Aunque los volúmenes del pozo sean generalmente calculados con la tubería dentro del pozo, se necesita conocer la capacidad del pozo sin la tubería, para saber el volumen que se necesita para llenar el pozo cuando se hacen viajes de tubería y mantener la presión hidrostática adecuada.

El pozo se compone de varios intervalos, para obtener la capacidad de todo el pozo, cada intervalo debe ser calculado individualmente, luego se suman todos los intervalos.

A continuación, se presenta la ecuación 4 con el cálculo el volumen para cada sección:

$$\text{Volúmen seccion}(bbl) = D^2 \text{sección} \times \frac{\text{longitud}(MD)}{1029.4} \quad (4)$$

**Ecuación 4.** Ecuación para obtener el volumen de cada sección.

**Fuente:** (M I SWACO, 2007)

La longitud de cada sección se va a utilizar la ecuación 5:

$$MD(ft) = \text{prof. del punto del csg} - \text{prof. del zapato del csg de la sección precedente} \quad (5)$$

**Ecuación 5.** Ecuación para obtener la longitud de cada sección.

**Fuente:** (M I SWACO, 2007)

La ecuación 6 nos permite calcular la capacidad interna del casing:

$$\text{Cap int}(bbl) = ID^2_{csg} \times \frac{\text{prof. del zapato del csg de la sección precedente}(MD)}{1029.4} \quad (6)$$

**Ecuación 6.** Ecuación para obtener la capacidad interna del casing.

**Fuente:** (M I SWACO, 2007)

De acuerdo al programa de fluidos se va a considerar un volumen en superficie (volumen de los tanques) de 700 barriles, para los cálculos respectivos.

### 5.6 Volúmenes de Fluido por la Sección Intermedia de 12.25 pulgadas

Del esquema del pozo (Anexo 3) se sacan lo siguientes datos:

- Diámetro de la sección: 12.25 pulgadas
- Profundidad del punto de casing de 9.625 pulgadas: 8422 ft
- Profundidad del zapato de 13.375 pulgadas: 4500 ft

Adicionalmente:

- ID del casing de 13.375 pulgadas: 12.415 pulgadas
- Volumen de tanques: 700 bbl

Realizando los cálculos pertinentes tenemos:

$MD (ft) = prof. del punto del csg - prof. del zapato del csg de la sección precedente$

$$MD (ft) = 8422 - 4500 = \mathbf{3922(ft)}$$

$$Volúmen seccion (bbl) = D^2 seccion \times \frac{longitud (MD)}{1029.4}$$

$$Volúmen seccion(bbl) = 12,25^2 \times \frac{3922}{1029.4} = \mathbf{571.74(bbl)}$$

$$Cap int (bbl) = ID^2 csg \times \frac{prof. del zapato del csg de la sección precedente(MD)}{1029.4}$$

$$Cap int (bbl) = 12,415^2 \times \frac{4500}{1029,4} = \mathbf{673,78 (bbl)}$$

$Volumen\ total(bbl) = Volumen\ hoyo\ abierto + Capacidad\ csg + Volumen\ en\ tanques$

$$Volumen\ total(bbl) = 571,74 + 673,78 + 700 = \mathbf{1945,52\ (bbl)}$$

A partir de 1945,52 (bbl) de volumen total y con las concentraciones de la formulación del fluido de perforación Natflex y el fluido de perforación base seleccionado elaborados para la sección de 12.25 pulgadas, se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 26** Libras requeridas por producto para la sección intermedia (fluido base)

Productos	Concentración (lpb)	Libras/Galones necesarios
Carbonato de Calcio 100	15,00	29190
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	1,00	1946
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	1,00	1946
Barita	75,00	145950
Glycol	3,50	817
Asfalto Líquido	3,50	817
Goma Xántica	1,00	1946
Lubricante	7,00	1635
Asfalto Sulfonado	3,50	6811

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021)

**Tabla 27** Libras requeridas por producto para la sección intermedia (fluido Natflex)

Productos	Concentración (lpb)	Libras/Galones necesarios
Carbonato de Calcio 100	15,00	29190
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	1,00	1946
Barita	75,00	145950
Glycol	3,50	817
Almidon de Yuca	2,00	3892
Bentonita	7,50	14595
Rheomax	6,00	1389
Bioasfalto	7,00	13622
Lubridrill	7,00	1635

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021).

Una vez obtenidas la cantidad de libras requeridas por cada producto, se procede a calcular la cantidad de sacos o tambores requeridos para esta sección como se muestra en la tabla 28.

**Tabla 28** Cantidad de Sacos-Tambores por producto fluido base

Productos	Libras/Galones necesarios	Presentación (lb/gal)	Cantidad de Sacos/Tambores
Carbonato de Calcio 100	29190	110	265
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	1946	55	35
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	1946	55	35
Barita	145950	100	1460
Glycol	817	55	15
Asfalto Líquido	817	5	163
Goma Xántica	1946	55	35
Lubricante	1635	55	30
Asfalto Sulfonado	6811	50	136

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021)

**Tabla 29** Cantidad de Sacos-Tambores por producto fluido Natflex

Productos	Libras/Galones necesarios	Presentación (lb/gal)	Cantidad de Sacos/Tambores
Carbonato de Calcio 100	29190	110	265
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	1946	55	35
Barita	145950	100	1460
Glycol	817	55	15
Almidon de Yuca	3892	55	71
Bentonita	14595	100	146
Rheomax	1389	5	278
Bioasfalto	13622	55	248
Lubridrill	1635	55	30

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021)

## 5.7 Cálculo y Comparación de Costos

Como ya se mencionó anteriormente, en la presente estimación económica, se va a tomar en cuenta el tipo de contrato de costos por producto. Para los cálculos se va a tomar en cuenta los valores obtenidos de los cálculos realizados anteriormente, como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 30** Costos Sección 12.25 Pulgadas (fluido base)

Productos	Cantidad de Sacos/Tambores	Precio Unitario por Saco/Tambor	Costo total por producto
Carbonato de Calcio 100	265	\$ 10,23	\$ 2.714,67
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	35	\$ 116,11	\$ 4.108,18
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC L	35	\$ 107,91	\$ 3.818,05
Barita	1460	\$ 13,95	\$ 20.360,03
Glycol	15	\$ 1.369,10	\$ 20.345,32
Asfalto Líquido	163	\$ 120,00	\$ 19.615,68
Goma Xántica	35	\$ 180,48	\$ 6.385,71
Lubricante	30	\$ 814,31	\$ 24.201,89
Asfalto Sulfonado	136	\$ 108,52	\$ 14.782,59
<b>VALOR TOTAL</b>			<b>\$ 116.332,12</b>

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021)

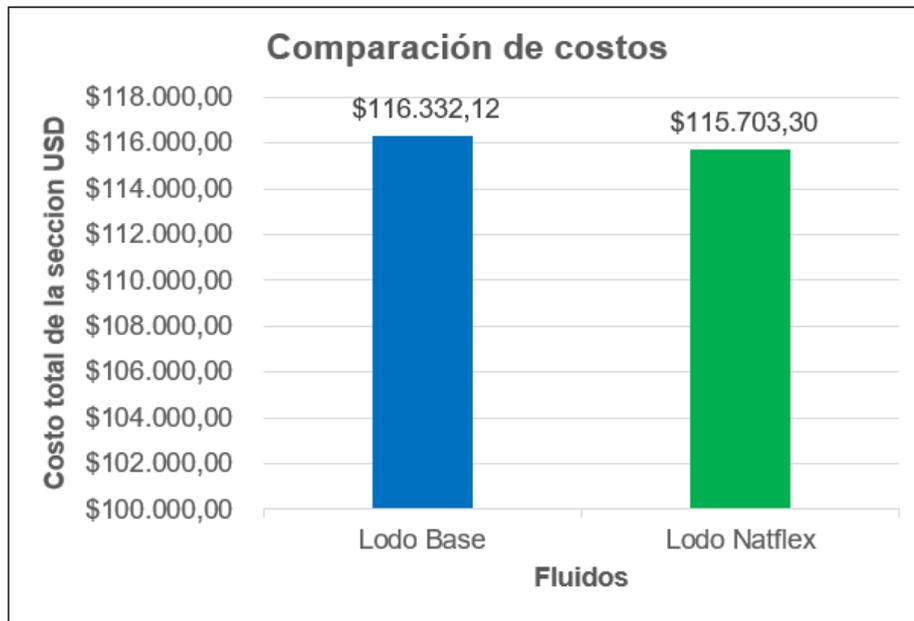
**Tabla 31** Costos Sección 12.25 Pulgadas (fluido Natflex)

Productos	Cantidad de Sacos/Tambores	Precio Unitario por Saco/Tambor	Costo total por producto
Carbonato de Calcio 100	265	\$ 10,23	\$ 2.714,67
Celulosa Poli aniónica Polimérica PAC H	35	\$ 116,11	\$ 4.108,18
Barita	1460	\$ 13,95	\$ 20.360,03
Glycol	15	\$ 1.369,10	\$ 20.345,32
Almidon de Yuca	71	\$ 120,00	\$ 8.491,64
Bentonita	146	\$ 18,00	\$ 2.627,10
Rheomax	278	\$ 85,00	\$ 23.620,55
Bioasfalto	248	\$ 60,00	\$ 14.860,36
Lubridrill	30	\$ 625,00	\$ 18.575,45
<b>VALOR TOTAL</b>			<b>\$ 115.703,30</b>

**Elaborado por:** Héctor Castellano

**Fuente:** (Sólidos y Lodos Nacionales S.A, 2021)

En el gráfico de puede observar una comparación de los valores totales de la sección intermedia, como se observa el fluido Natflex presenta un menor valor, pero no existe mucha diferencia con el valor del lodo base.



**Figura 20** Costo total de la sección intermedia de los lodos seleccionados.

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

Desde el punto de vista de análisis económico se buscó tener una referencia de cual sería un valor estimado si utilizamos el lodo de perforación ecológico Natflex en la perforación, como se observa en la figura anterior el costo estimado es de \$115.703,30 basándonos en el programa de fluidos para la sección intermedia.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- De los resultados experimentales de las pruebas de laboratorio para el fluido de perforación Natflex, se puede concluir que, si es posible elaborar un fluido ecológico base agua, sustituyendo los aditivos convencionales por unos amigables con el ambiente para que la zona de interés no se vea afectada por el reemplazo de estos.
- El Almidón de Yuca demostró ser un aditivo ecológico que funciona adecuadamente a la concentración efectiva de 2 lbp, cumpliendo su función como controlador de filtrado mostrando valores menores a 5,3 cc/30min de filtrado.
- El aditivo Rheomax con una concentración efectiva a 6 lbp influye positivamente en la reología del sistema dando valores de viscosidad plástica de 20 cP, punto cedente de 24 lbf/100ft<sup>2</sup> y esfuerzo de gel de 8/22 lbf/100 ft<sup>2</sup> por lo que se deduce que posee un buen comportamiento de modelo reológico para la perforación de la sección.
- El Bioasfalto funciona correctamente como inhibidor a una concentración de 7 lbp y un pH de 9, se observa que el lodo con Bioasfalto presenta menor valor porcentual de hidratación (29,25%) e hinchamiento (34,83%), demostrando un mayor rendimiento inhibitorio, el fluido de perforación Natflex muestra un menor índice de rendimiento (64,09%) con respecto al lodo base (90,29%)
- Al comparar los resultados de las pruebas de laboratorio sin someterlos a un cambio de temperatura con excepción de la prueba de inhibición, entre el lodo base y el lodo Natflex se observó que los parámetros de densidad, reología, tixotropía, filtrado, contenido de arena, pH e inhibición están dentro de los rangos operacionales recomendados por lo que se concluye que el lodo Natflex se ajusta a las propiedades del programa de fluidos.

- Desde el punto de vista del análisis económico el lodo Natflex presenta bondades económicas similares al lodo convencional, mostrando como valor agregado su beneficio ambiental y en consecuencia con el cuidado del planeta.

## **6.2 Recomendaciones**

- Debido a fines de evaluación y dada la dificultad logística derivada de la pandemia con el objetivo de validar el sistema inhibitorio del lodo Natflex se aplica el índice de rendimiento para la formación Tiyuyacu el cual si muestra el beneficio de inhibición, sin embargo se puede también evaluar con otras formaciones comunes de la sección intermedia como Chalcana y Orteguaza.
- Según los manuales de fluidos, la prueba de hinchamiento lineal muestra resultados más exactos de cualquier sistema de inhibición con respecto a la prueba de índice de rendimiento que fue la utilizada en este trabajo, así que podría realizarse esta prueba para el lodo Natflex.
- Se recomienda que la presentación final de los aditivos ecológicos Almidón de Yuca y Bioasfalto tengan un proceso de reducción de tamaño granulométrico, es decir que los mismos sean al menos tamizados por una malla 100 ya que esto facilitará que la mezcla del fluido de perforación sea más homogénea.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

- Alomoto, M., & Torres, C. (2005). Evaluación de la Inhibición de los Efectos de Hinchamiento y Dispersión de los Componentes Arcillosos Incorporados en un Fluido de Perforación Base Agua. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Baby, P; Rivadeneira, M; Barragán, R. (2004). La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Columna tectónico-estratigráfica de la Cuenca Oriente [imagen]. Obtenido de <https://books.openedition.org/ifea/2984>.
- Baker Hughes, Drilling Fluids (2014). Programa de Fluidos de Perforación Río Napo.
- API. (2001). *Manual de Fluidos de Perforación* (p. 792).
- Con aceite de palma producen bioasfalto*. (n.d.). Retrieved March 31, 2022, from <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/1166-con-aceite-de-palma-producen-bioasfalto>
- González, J., Martínez, Á., Vega, R., & Otahola, J. (2012). *Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development*.
- Guerra, V. (2016). *ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DEL USO PERMANENTE DE FLUIDOS AIREADOS DURANTE LA PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN INTERMEDIA DE 12 ¼" EN ZONAS DE BAJA PRESIÓN*".
- La química como aliada para aumentar la recuperación del agua dentro de una gestión eficiente y sostenible de la minería*. (n.d.). Retrieved March 31, 2022, from <https://proactivo.com.pe/la-quimica-como-aliada-para-aumentar-la-recuperacion-del-agua-dentro-de-una-gestion-eficiente-y-sostenible-de-la-mineria/>
- Leite, L. (n.d.). *Asfaltos verdes Asfaltos Vegetales*.
- Liu, Y., Qiu, Z., Zhong, H., Meng, M. M., Zhao, X., Nie, Z., & Huang, W. (2019). Development of a novel anti-temperature, anti-wear and ecofriendly lubricant SDL-1 for water-based drilling fluid. *International Petroleum Technology Conference 2019, IPTC 2019*, 1–16. <https://doi.org/10.2523/iptc-19406-ms>
- PDVSA. (2002). Manual de Fluidos de Perforación. In *Ma* (p. 285).
- Perforaciones Tartagal- Salta: TIPOS DE LODOS DE PERFORACIÓN*. (n.d.). Retrieved December 20, 2021, from <http://perforacionestartagal.blogspot.com/2017/05/tipos-de-lodos-de-perforacion.html>
- Rheomax® DR High Performance*. (n.d.). Retrieved March 25, 2022, from [https://energy-resources.basf.com/global/en/mining\\_solutions/flocculants/rheomax\\_d\\_high\\_performance.html](https://energy-resources.basf.com/global/en/mining_solutions/flocculants/rheomax_d_high_performance.html)
- Villarroel, L., & Izurieta, P. (2014). *UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA , MINAS , PETRÓLEOS Y DISEÑO DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN DRILL-IN COMPUESTO POR CARBONATO DE CALCIO PARA MINIMIZAR EL DAÑO EN FORMACIONES PRODUCTORAS EN EL CAMPO SACHA . Trabajo de Titulac*.

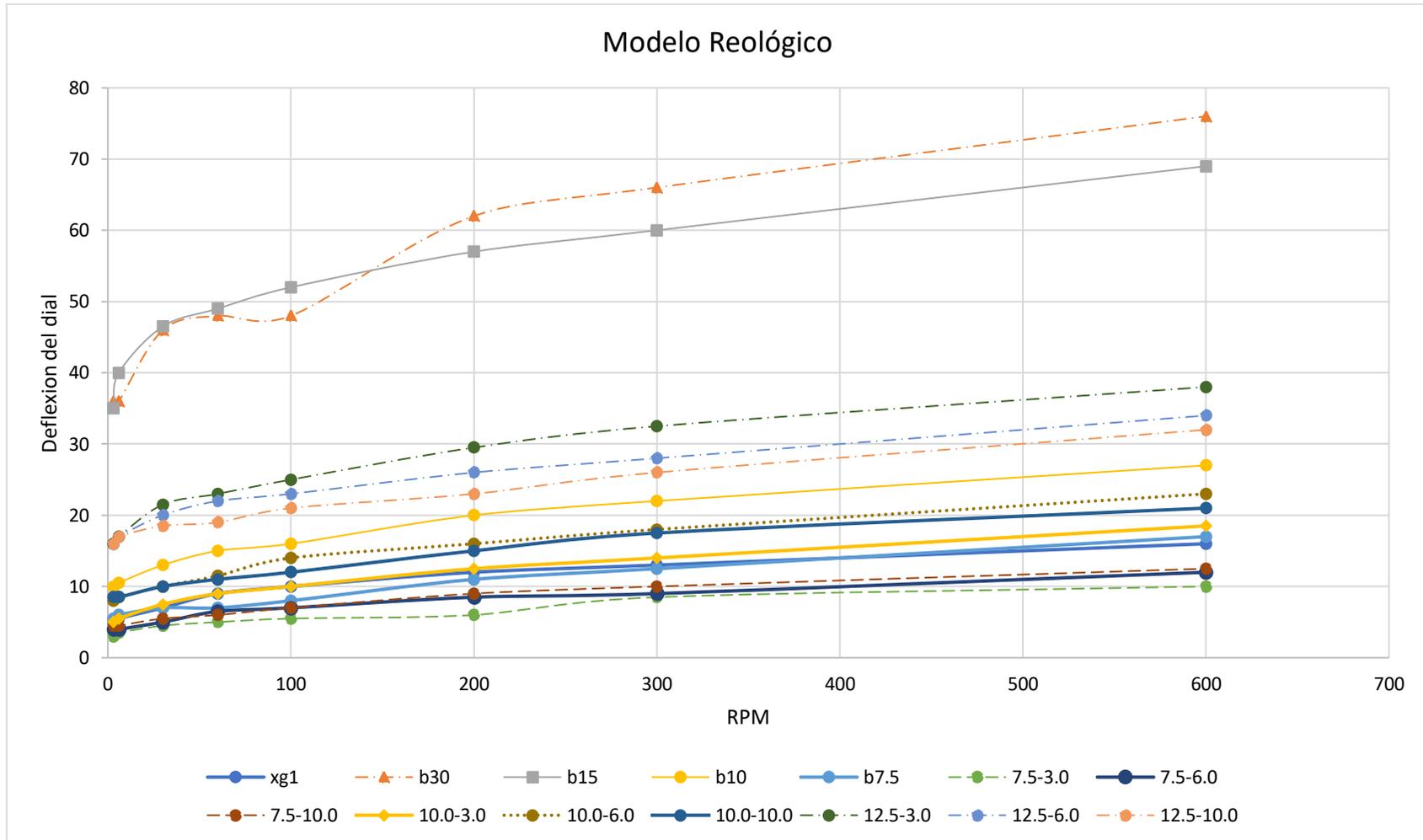
## ANEXOS

### Anexo 1

<b>REOLOGIA VISCOSIDAD</b>														
	<b>Goma Xanthan</b>	<b>Bentonita</b>				<b>Sistema Bentonita-RHEOMAX</b>								
						<b>7,5 lbp</b>			<b>10 lbp</b>			<b>12,5 lbp</b>		
	<b>1 lbp</b>	<b>30 lbp</b>	<b>15 lbp</b>	<b>10 lbp</b>	<b>7,5 lbp</b>	<b>3 lbp</b>	<b>6 lbp</b>	<b>10 lbp</b>	<b>3 lbp</b>	<b>6 lbp</b>	<b>10 lbp</b>	<b>3 lbp</b>	<b>6 lbp</b>	<b>10 lbp</b>
<b>Vp, cP</b>	3	10	9	5	4,5	1,5	3	2,5	4,5	5	3,5	5,5	6	6
<b>Yp, lb/ft<sup>3</sup></b>	10	56	51	17	8	7	6	7,5	9,5	13	14	27	22	20
<b>600 rpm</b>	16	76	69	27	17	10	12	12,5	18,5	23	21	38	34	32
<b>300 rpm</b>	13	66	60	22	12,5	8,5	9	10	14	18	17,5	32,5	28	26
<b>200 rpm</b>	12	62	57	20	11	6	8,5	9	12,5	16	15	29,5	26	23
<b>100 rpm</b>	10	48	52	16	8	5,5	7	7	10	14	12	25	23	21
<b>60 rpm</b>	9	48	49	15	7	5	6,5	6	9	11,5	11	23	22	19
<b>30 rpm</b>	7	46	46,5	13	7	4,5	5	5,5	7,5	10	10	21,5	20	18,5
<b>6 rpm</b>	5,5	36	40	10,5	6	3,5	4	4,5	5,5	8,5	8,5	17	17	17
<b>3 rpm</b>	5	36	35	10	5,5	3	4	4,5	5	8	8,5	16	16	16

**Tabla 32.** Tabla de resultados de reología y tixotropía de los sistemas para calcular la viscosidad.

**Elaborado por:** Héctor Castellano.



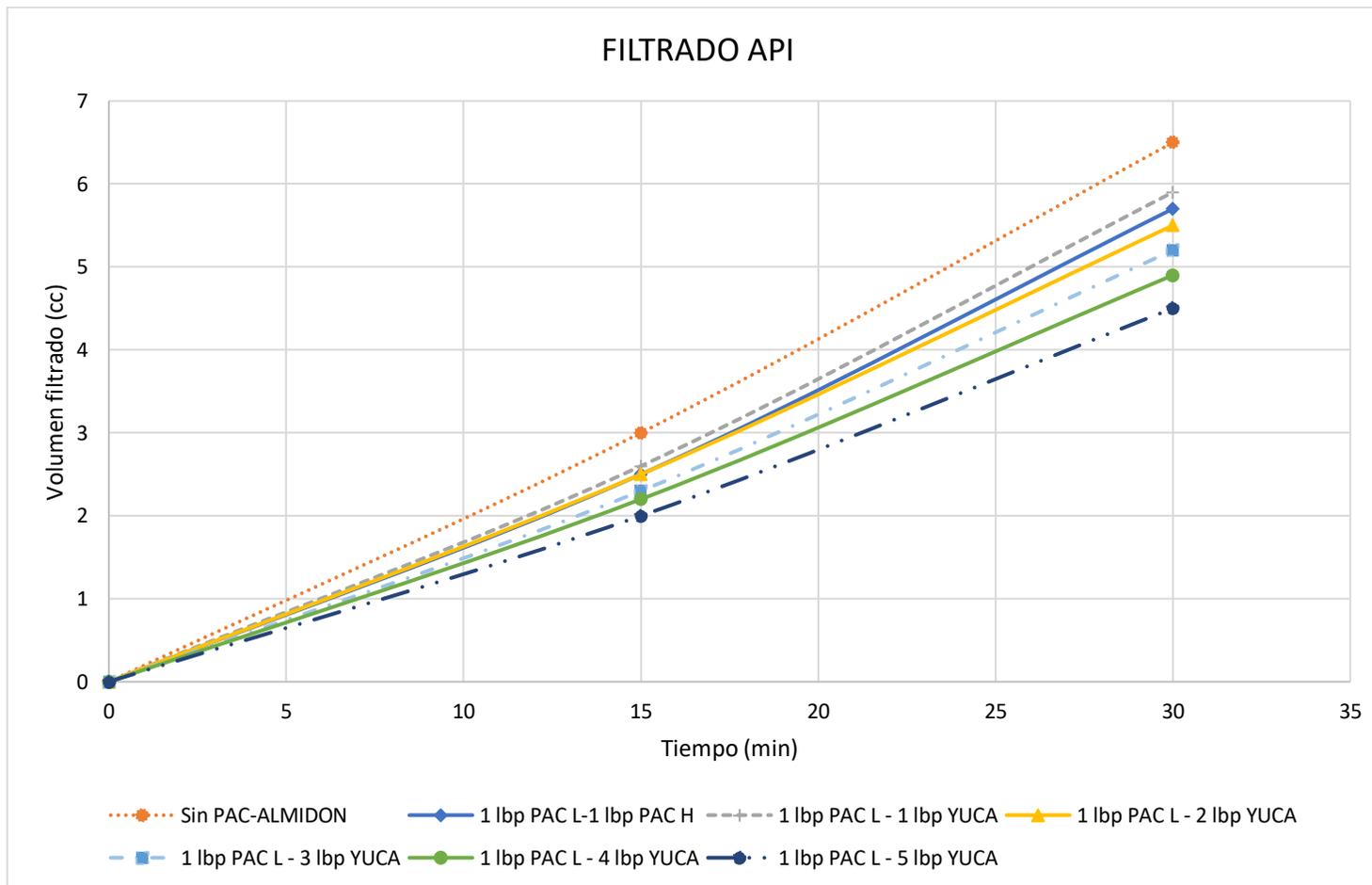
**Figura 21.** Curvas de modelo reológicos sistemas de viscosidad.

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

**Tabla 33.** Resultados de las pruebas de volumen de filtrado sistemas de control de filtrado

<b>FILTRADO API</b>							
	<b>LODO BASE</b>						
	Sin PAC Sin ALMIDON	1 lbp PAC L 1 lbp PAC H	1 lbp YUCA 1 lbp PAC H	2 lbp YUCA 1 lbp PAC H	3 lbp YUCA 1 lbp PAC H	4 lbp YUCA 1 lbp PAC H	5 lbp YUCA 1 lbp PAC H
	0	0	0	0	0	0	0
<b>Filtrado cc/15 min</b>	3	2,5	2,6	2,5	2,3	2,2	2,0
<b>Filtrado cc/30 min</b>	6,5	5,7	5,9	5,5	5,2	4,9	4,5
<b>Cake cm</b>	1,3	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	2,0

**Elaborado por:** Héctor Castellano.



**Figura 22.** Curva de filtrado de sistemas de control de filtrado

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

## ANEXO 2

Tabla 34. Reología y Tixotropía base vs Natflex.

Propiedad		Unidad	LODO BASE	LODO NATFLEX
Lecturas dial	3 rpm	-	8	10
	6 rpm	-	10	10,5
	30 rpm	-	18	16,5
	60 rpm	-	23	20
	100 rpm	-	29	26,5
	200 rpm	-	39	36
	300 rpm	-	46	44
	600 rpm	-	65	64
Plastic Viscosity		Cp	19	20
Yield Point (YP)		lb/100ft <sup>2</sup>	27	24
Aparent Viscosity		Cp	32,5	32
Geles	10 sec	lb/100ft <sup>2</sup>	8,5	8
	10 min	lb/100ft <sup>2</sup>	12	22

Elaborado por: Héctor Castellano.

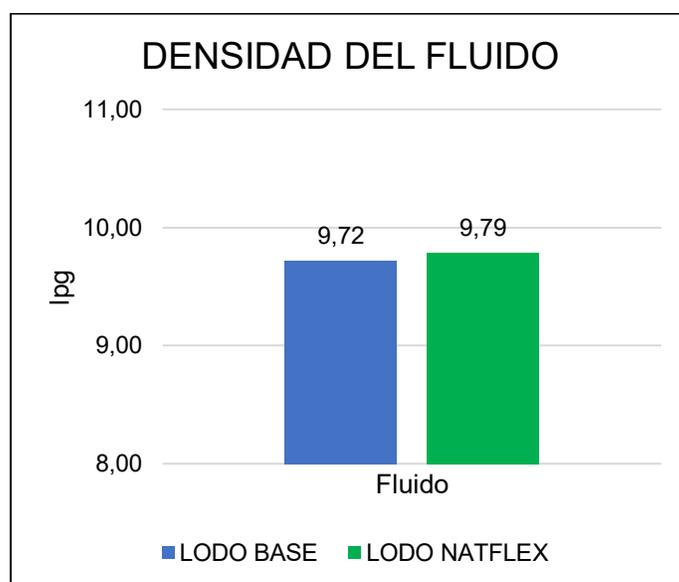
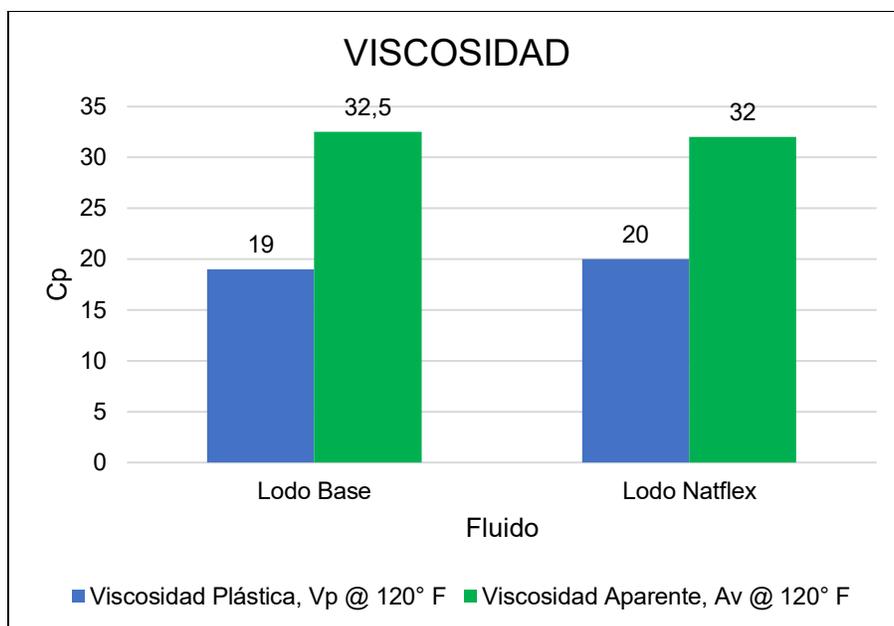


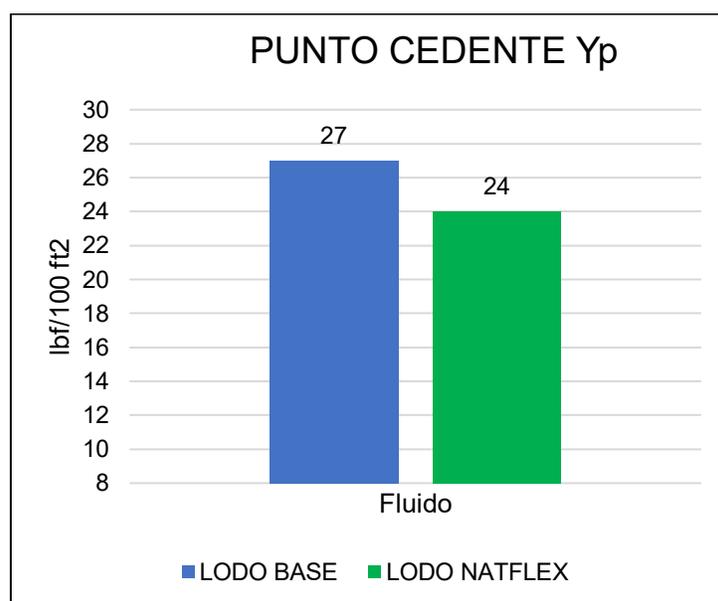
Figura 23. Densidad de lodo Base y Lodo Natflex.

Elaborado por: Héctor Castellano.



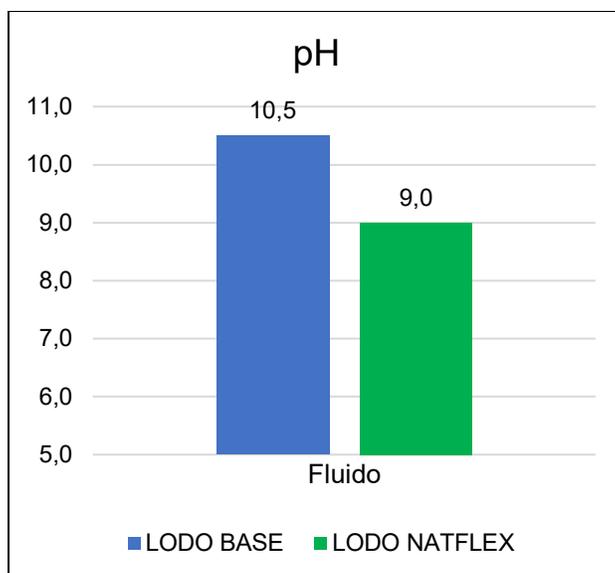
**Figura 24.** Viscosidad platica y aparente del Lodo Base y Lodo Natflex.

**Elaborado por:** Héctor Castellano.



**Figura 25.** Punto Cedente del Lodo Base y Lodo Natflex.

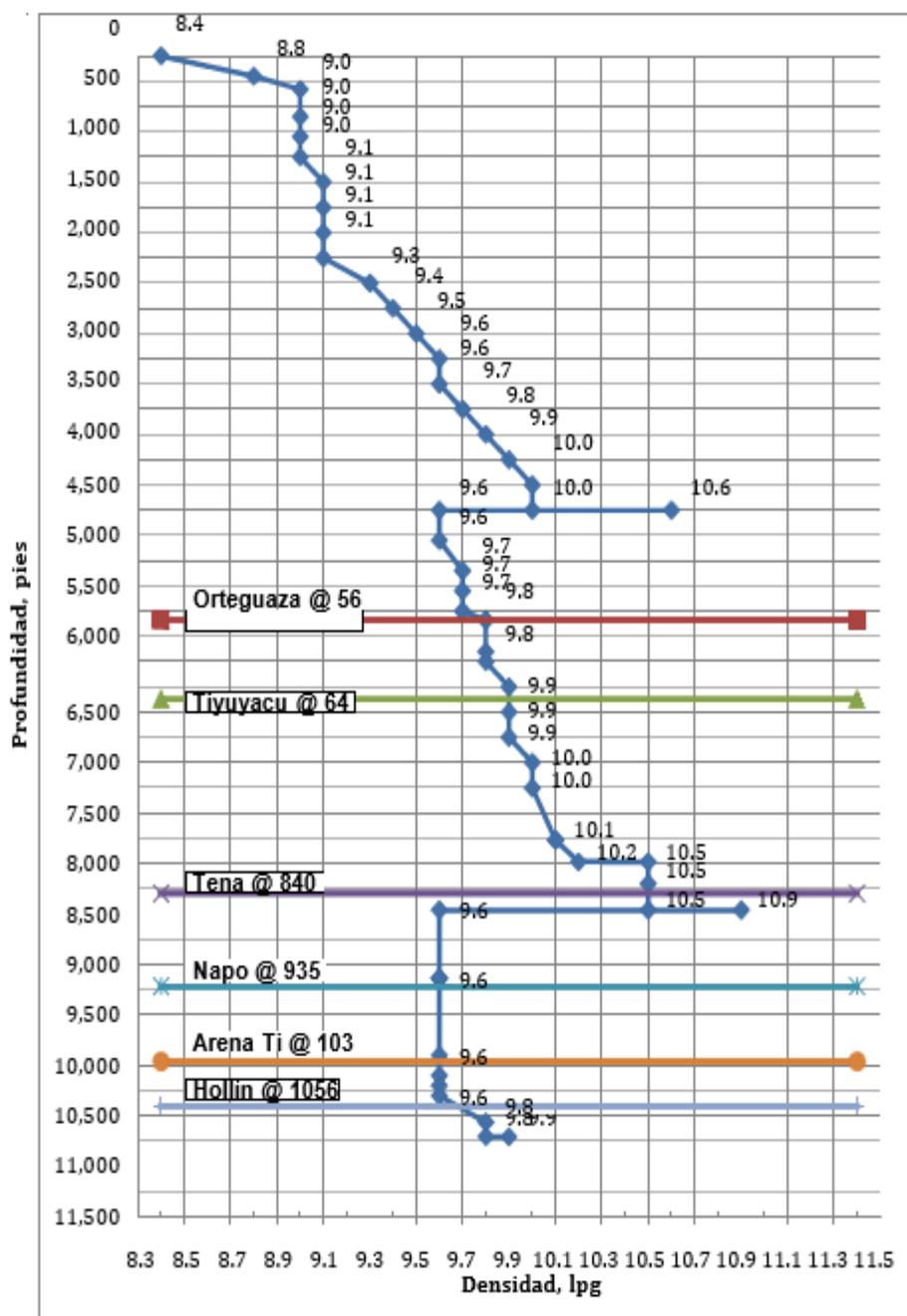
**Elaborado por:** Héctor Castellano.



**Figura 26.** pH del Lodo Base y Lodo Natflex.

**Elaborado por:** Héctor Castellano.

## ANEXO 3



**Figura 27.** Esquema de densidades.

**Fuente:** Programa de fluidos de perforación.