

Caracterización fisicoquímica del subproducto sólido del proceso de deshidratación de borras  
tratadas en planta amir

Helbert Mauricio Delgado Fetecua

Trabajo de Grado para Optar al título de Especialista en Química Ambiental

Director

Julio César Calvo Corredor

Mg Ingeniería Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

Primero a Dios por permitirme realizar este nuevo proyecto de formación profesional.

A mi hija Valentina por ser ese motor para buscar nuevos retos y metas.

A mi novia Brenda por brindarme todo el apoyo durante la realización de esta especialización.

A mi familia por su amor incondicional y aliento durante el desarrollo de esta etapa de aprendizaje de nuevos conocimientos.

### **Agradecimientos**

Agradecimientos a los compañeros de la empresa Veolia servicios Industriales que laboran dentro de la planta Amir.

Al ingeniero Julio Calvo por la dedicación y orientación en el desarrollo de este proyecto.

A la empresa Dominion Colombia S.A.S por permitirme los espacios para la toma de clases y permitir el desarrollo de esta especialización.

Al laboratorio de combustión de combustibles de la universidad del Valle por el desarrollo de los análisis desarrollados.

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Lodos aceitosos o borras.....	16
2.2 Tipos de lodos aceitosos o borras .....	17
2.4 Tecnologías para el tratamiento de lodos aceitosos o borras.....	20
2.4.1 Extracción solvente .....	21
2.4.2 Congelación y descongelación.....	21
2.4.3 Irradiación ultrasónica .....	22
2.4.4 Irradiación por microondas .....	22
2.4.5 Pirólisis .....	23
2.4.6 Flotación por espuma.....	23
2.4.7 Vertedero.....	24
2.4.8 Incineración.....	25
2.4.9 Desorción térmica .....	26
2.5 Centrifugación.....	26
2.5.1 Proceso de deshidratación de borras.....	27

---

2.5.2 Coprocesamiento en hornos de clinkerización .....	28
2.5.3 Biorremediación.....	30
3. Metodología .....	31
3.1 Estado del arte.....	31
3.1.1 Características del lodo del fondo del tanque .....	32
3.3 Resultados .....	37
3.3.1 Análisis de agua y sedimentos en lodo aceitoso recibido .....	37
3.3.2 Caracterización Físicoquímica del subproducto sólido proceso deshidratación de borras..	37
3.3.2.1 Análisis de retorta. ....	39
3.3.3 Cálculos.....	39
3.4 Discusión de resultados.....	41
3.4.1 Metales Pesados .....	42
3.4.2 Composición de subproducto sólido .....	42
4. Conclusiones.....	43
5. Recomendaciones .....	44
Referencias Bibliográficas .....	45
Apéndices.....	50

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Proceso deshidratación de borras .....	28
Figura 2. Muestra lodo aceitoso y análisis de BS&W .....	34
Figura 3. Prueba de jarras y descargue de lodo aceitoso .....	34
Figura 4. Descarga Sólida y líquida proceso deshidratación .....	35
Figura 5. Subproducto sólido del proceso deshidratación de lodos aceitosos .....	36
Figura 6. Prueba de análisis de retorta .....	36
Figura 7. Resultado ensayo de retorta a subproducto sólido proceso deshidratación.....	40

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Concentraciones Típicas de metales en Lodos Aceitosos .....	20
Tabla 2. Criterios de aceptación para el coprocesamiento de residuos peligrosos .....	29
Tabla 3. Análisis de BS&W .....	37
Tabla 4. Análisis Próximo a subproducto sólido deshidratación de borras .....	38
Tabla 5. Análisis de metales pesados Totales a subproducto sólido de deshidratación de borras	38

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. ....	50
Apéndice B.....	56

## Glosario

**Borra:** material semisólido pastoso formado por arena (una mezcla de arcilla, sílice y óxidos) contaminada por el petróleo, el agua producida y los productos químicos utilizados en el procesamiento del petróleo.

**BSW:** relación de mezcla entre agua, lodo y arena presentes en los lodos aceitosos.

**Deshidratación:** Se denomina deshidratación de lodos al proceso de separación fisicoquímica de las fases sólidas y líquidas de los fluidos de desecho.

**Floculante:** Sustancia química que aglutina sólidos en suspensión, provocando su precipitación.

**Lodos Aceitoso:** desechos pastosos con contenido de hidrocarburos, como: sólidos congénitos del crudo, hidrocarburos impregnados al suelo, sedimentos de sistemas de contención de hidrocarburos (tanques, fosas, presas, etc.).

**Metal Pesado:** Es un miembro de un grupo de elementos químicos no muy bien definidos, que exhibe propiedades metálicas

**Residuos peligrosos:** elementos o sustancias que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan, que poseen características patógenas, tóxicas, combustibles, inflamables, explosivas, radiactivas o volátiles; y los empaques y envases que los hayan contenido, como también lodos, cenizas y similares

**Separación mecánica:** Técnica de separación con base en las diferencias en tamaño y densidad.

**Test de Jarras:** Consiste en la simulación en vasos de precipitado el proceso de coagulación floculación que se producirá en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento.

## Resumen

**Título:** Caracterización fisicoquímica del subproducto sólido del proceso de deshidratación de borras tratadas en planta Amir\*

**Autor:** Helbert Mauricio Delgado Fetecua\*\*

**Palabras Clave:** Lodos aceitosos, centrifugación, BS&W, poder calorífico, retorta

### Descripción:

La generación de borras o lodos aceitosos en las actividades de producción, transporte y refinación presentan un enorme problema para su tratamiento y disposición. Los tanques de almacenamiento de petróleo y los sistemas de separación de agua y petróleo en los campos petroleros se encuentran entre las mayores fuentes de producción de lodos de petróleo (Rahman, 2003). Las borras están constituidas principalmente por arena, agua y aceite emulsionado, un mal manejo puede ocasionar daño al medio ambiente y a la salud por clasificarse como un residuo peligroso. Los procesos de recuperación de hidrocarburos o energía a partir de lodos aceitosos brindan la ventaja de agregar valor a un material que es considerado como un desecho y reducir la cantidad de material que requiere disposición.

En este trabajo se realizó la caracterización fisicoquímica al subproducto sólido del proceso de deshidratación de borras generadas en los mantenimientos de los tanques de estaciones de producción del campo la Cira Infantas, para validar si tiene algún aprovechamiento este residuo peligroso en otro proceso.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Química. Especialización en química Ambiental. Julio Cesar Calvo Corredor Mr Ingeniería Ambiental

### Abstract

**Title:** Physicochemical characterization of the solid by-product of the dehydration process of treated sludge in the Amir plant\*

**Author(s):** Helbert Mauricio Delgado Fetecua\*\*

**Key Words:** Oily sludge, centrifugation, BS&W, calorific value, retort

**Description:**

The generation of oily sludge or sludge in production, transportation and refining activities presents a huge problem for its treatment and disposal. Oil storage tanks and oil-water separation systems in oil fields are among the largest sources of oil sludge production (Rahman, 2003). The sludge is mainly made up of sand, water and emulsified oil, poor handling can cause damage to the environment and health because it is classified as a hazardous waste. Hydrocarbon or energy recovery processes from oily sludge offer the advantage of adding value to a material that is considered a waste and reducing the amount of material that requires disposal.

In this work, the physicochemical characterization of the solid by-product of the dehydration process of sludge generated in the maintenance of the tanks of production stations of the Cira Infantas field was carried out, to validate if this hazardous residue has any use in another process.

---

\* Project of grade

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Química. Especialización en química Ambiental. Julio Cesar Calvo Corredor Mr Ingeniería Ambiental

## Introducción

La generación de borras o lodos aceitosos en las actividades de producción, transporte y refinación presentan un enorme problema para su tratamiento y disposición. Los tanques de almacenamiento de petróleo y los sistemas de separación de agua y petróleo en los campos petroleros se encuentran entre las mayores fuentes de producción de lodos de petróleo (Rahman, 2003). La acumulación de lodos de petróleo en el fondo del tanque ocupa una gran fracción del espacio del tanque y, en consecuencia, reduce la capacidad del tanque. Cuando la fracción de lodo alcanza un cierto nivel de un tanque, las operaciones del tanque deben detenerse para eliminar físicamente el lodo del tanque (Wang, 2010).

Grandes cantidades de lodos de petróleo se generan en Colombia cada año durante la producción y procesamiento de petróleo. Por ejemplo, en Colombia en el año 2019 se reportaron 335.992 toneladas de este tipo de residuo peligroso (IDEAM, 2019, p. 52), estos lodos de petróleo deben manipularse adecuadamente para evitar la contaminación del suelo y aguas subterráneas, para utilizar potencialmente la valiosa fracción de petróleo y para dar valorización y disminuir los volúmenes de lodos en su disposición.

Las borras están constituidas principalmente por arena, agua y aceite emulsionado, un mal manejo puede ocasionar daño al medio ambiente y a la salud por clasificarse como un residuo peligroso.

El impacto de los lodos aceitosos, cuando se desecha de manera inadecuada en los suelos, es tal que las propiedades físicas y químicas pueden alterarse, provocando cambios

morfológicos, escasez de nutrientes o incluso inhibición del crecimiento (Hu et al. 2013; Hui et al. 2020).)

La composición química de los lodos aceitosos varía en un amplio rango, dependiendo de la fuente de petróleo crudo, el esquema de procesamiento y el equipo y reactivos utilizados en el proceso de refinado. Por ejemplo, el contenido total de hidrocarburos de petróleo (TPH) en los lodos aceitosos suele oscilar entre 15% a 50% p/p, mientras que los contenidos de agua y sólidos están en el rango de 30-85% y 5-46%, respectivamente (Liu et al., 2012; Mohan and Chandrasekhar, 2011; Tahhan et al., 2011).

Las estrategias de gestión de lodos aceitosos con resultados beneficiosos se pueden categorizar como: 1. tecnologías con recuperación de petróleo, y 2. tecnologías para la recuperación de energía sin recuperación de petróleo. Las alternativas con la recuperación de petróleo incluyen la extracción por solventes, la centrifugación, la recuperación de petróleo mejorada con surfactantes y la pirólisis. Las alternativas sin recuperación de aceite, pero con recuperación de energía incluyen la incineración y la codigestión anaeróbica.

El presente trabajo busca caracterizar fisicoquímicamente el subproducto sólido del proceso de deshidratación de borras y en base a los resultados analizar si puede llegar a tener un grado de valorización y disminuir el volumen de residuos peligrosos para disposición.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Realizar la caracterización fisicoquímica de los sólidos separados en el proceso de deshidratación de las borras mediante centrifugación.

### 1.2 Objetivos Específicos

Realizar revisión del estado del arte con respecto a la caracterización fisicoquímica de los sólidos separados en procesos de deshidratación de borras generadas en ciclos de producción.

Describir el proceso de manejo, tratamiento y disposición de las fases generadas en la deshidratación de borras correspondientes al ciclo de producción de hidrocarburos.

**Caracterizar** Fisicoquímica de los sólidos separados mediante el proceso de deshidratación de borras.

**Análisis** de los resultados fisicoquímicos de las mediciones de los sólidos separados en el proceso de deshidratación de hidrocarburos.

## 2. Marco Teórico

La industria del petróleo acumula cada año aproximadamente 60 millones de toneladas de lodos de petróleo en todo el mundo (Hu et al., 2013). De hecho, se estimó que se han almacenado más de mil millones de toneladas de lodos en todo el mundo (Mirghaffari, 2017). El manejo y la eliminación inadecuados de este lodo peligroso representan un riesgo de contaminación del suelo, aguas subterráneas y contaminación del aire a través de la liberación de compuestos orgánicos volátiles (COV). Varios componentes de los lodos aceitosos (aceite y sólidos de lodos) son tóxicos, mutagénicos y cancerígenos (Liu et al., 2010).

Sin embargo, también representa un recurso energético considerable debido a sus concentraciones relativamente altas de hidrocarburos de petróleo, cuya recuperación podría ser la opción de gestión más deseable con las ventajas de generar ganancias y reducir el volumen de residuos y la concentración de contaminantes (Hu et al., 2013).

### 2.1 Lodos aceitosos o borras.

Los lodos aceitosos, los desechos aceitosos más abundantes generados en las refinerías, son un material semisólido pastoso formado por arena (una mezcla de arcilla, sílice y óxidos) contaminada por el petróleo, el agua producida y los productos químicos utilizados en el procesamiento del petróleo (Heidarzadeh et al., 2010).

Los tanques de almacenamiento de petróleo y los sistemas de separación de agua y petróleo en los campos petroleros se encuentran entre las mayores fuentes de producción de lodos de petróleo (Rahman et al, 2017).

La acumulación de lodos de petróleo en el fondo del tanque ocupa una gran fracción del espacio del tanque y, en consecuencia, reduce sustancialmente la capacidad del tanque. Cuando la fracción de lodo alcanza un cierto nivel de un tanque, las operaciones del tanque deben detenerse para eliminar físicamente el lodo del tanque (Wang et al, 2010).

Las borras generadas en los tanques y tuberías de la industria del petróleo son residuos que se forman después de largos periodos de tiempo, por sedimentación y aglomeración de compuestos hidrocarbonados, especialmente de cadenas más largas, presentes en el crudo, sólidos, sedimentos (rocas, arena, lodos de perforación, entre otros), materia orgánica y agua. Como consecuencia de las aglomeraciones de los hidrocarburos, la emulsión del agua en el crudo y la retención de sedimentos en aquella; los grados API disminuyen, alcanzando valores incluso inferiores a 10 °API, formándose masas densas y viscosas, difíciles de bombear, que se depositan en el fondo de los tanques, reduciendo su capacidad, o generan taponamientos en las tuberías. (Carrasco M, 2000).

## **2.2 Tipos de lodos aceitosos o borras**

La clasificación de las borras dependerá directamente del tipo de crudo almacenado en el tanque, a su vez el tipo de crudo dependerá de su composición. En general según La Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, establece que la composición de un crudo es: 83 – 87%

de Carbono, 11 – 14% de Hidrogeno, 0 – 5% de Oxígeno, 0 – 6% de azufre, 0 – 0.5% de Nitrógeno y 0 – 0.1% de Compuestos inorgánicos

De acuerdo con esto el crudo se puede clasificar según su composición en: (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. 2007)

Parafínicos: sus compuestos principales son hidrocarburos saturados de bajo peso molecular, lo que permite que sean crudos muy fluidos. Tienen una densidad alrededor de 0,85 kg/L y están por encima de los 31° API. Son los crudos más apetecidos comercialmente y de mayor precio, por su facilidad de ser procesados y por la calidad de los productos obtenidos. Estos crudos producen mayores porcentajes de parafinas, naftas (solventes y gasolinas) y bases de aceites lubricantes que otros crudos.

Nafténicos: sus compuestos principales son naftenos e hidrocarburos aromáticos; tienen un mayor peso molecular que los compuestos parafínicos y una densidad alrededor de 0,95 kg/L. Están entre los 10 y los 22° API, siendo muy viscosos y de coloración oscura. Generan gran cantidad de residuos en los procesos de destilación, principalmente asfalto.

Mixtos: están formados por toda clase de hidrocarburos: parafinas, naftenos, hidrocarburos saturados, insaturados y aromáticos, entre otros, encontrándose densidades alrededor de 0,9 kg/L y gravedades API entre los 22° y los 31°. • Dulce: su contenido de azufre es menor de 0,5%, por lo cual requiere menor costo en su proceso de refinación para producir gasolina.

Agrio: su contenido de azufre es mayor que 1%, necesitando mayor inversión en su procesamiento para retirar este contaminante.

Los lodos aceitosos generalmente se pueden considerar como una emulsión estable de gotas acuosas con partículas sólidas dispersas en un líquido aceitoso con una alta viscosidad

(Yan, 2012). Sin embargo, el lodo aceitoso es una mezcla extremadamente complicada de hidrocarburos saturados y aromáticos, no hidrocarburos, asfáltenos y resinas (Zhang J, et, al 2012). La fase sólida no solo contiene silicatos, sino también otras impurezas mezcladas durante la formación de lodos, como hierro, cloro y azufre (Pinheiro, 2013).

Sin embargo, falta una caracterización detallada de los sólidos inorgánicos y su papel en la estabilidad de la emulsión de aceite, aunque se encontró que el contenido de materia mineral y la abundancia de compuestos orgánicos insolubles contenidos en los depósitos sólidos estaban bien correlacionados. (Carbognani,1999). En la industria bituminosa-arena, se ha informado que las partículas minerales finas, como la arcilla, juegan un papel decisivo en las interacciones aceite-sólido-agua (Sparks, 2003).

### 2.3 Composición del lodo

La composición de los lodos de petróleo varía en complejidad de un lugar a otro debido a numerosos factores: calidad de los crudos, procedimientos de separación (petróleo-agua), fugas no planificadas, historial de mezcla, tratamiento y almacenamiento (Aguelmous et al. 2019 ; Kriipsalu et al. , 2008 ; Shailubhai, 1986 ). La composición típica varía de contaminantes inorgánicos a orgánicos. Los contaminantes inorgánicos suelen ser metales como el zinc, el plomo, el cobre, el níquel, el cromo y el mercurio, que pueden causar graves problemas de salud si se filtran en los puntos de toma de agua (Aguelmous et al. 2019). Los contaminantes orgánicos, por otro lado, incluyen hidrocarburos de petróleo (PHC); hidrocarburos totales de petróleo (TPH), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), n-alcanos, parafinas, compuestos aromáticos como el xileno (BTEX); asfálticos tales como fenoles y porfirinas; resinas como

piridinas; así como ceras, alquitranes, olefinas, etc. Solo una selección de estos componentes orgánicos recibe la debida atención de acuerdo con su impacto en los humanos (Li et al. [2020a](#) ; Marzuki et al. [2020](#) ; Swathi et al. [2020](#) ; Zain et al. [2010](#) ).

**Tabla 1.**

*Concentraciones Típicas de metales en Lodos Aceitosos*

METAL	Concentración mg/Kg
Zinc	7-80
Plomo	0,001-0,12
Cobre	32-120
Nikel	17-25
Cromo	27-80

Nota. Tomado de: Instituto Americano del Petróleo (API) (1989)

## 2.4 Tecnologías para el tratamiento de lodos aceitosos o borras.

El tratamiento de los residuos oleosos es necesario para evitar la contaminación del suelo para mantener la funcionalidad del suelo y proteger la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, que son bienes públicos y reservas estratégicas para el abastecimiento público y el desarrollo ambientalmente sostenible (Da Silva, 2012).

Muchos procesos físicos, fisicoquímicos y biológicos están disponibles para tratar lodos aceitosos, como el vertido; incineración; co-procesamiento en hornos de clinkerización; irradiación por microondas; centrifugación; destilaciones destructivas; conversión a baja temperatura; plasma térmico; incorporación en materiales cerámicos; desarrollo de materiales de impermeabilización; encapsulación; biodegradación en landfarming; biopilas y biorreactores.

### ***2.4.1 Extracción solvente***

Esta es una técnica simple que implica una mezcla agresiva para eliminar partículas sólidas, agua y otras impurezas, dejando hidrocarburos reciclables. Esto se logra mediante la destilación, que hace que la mezcla se separe, lo que permite la recuperación de petróleo de la mezcla de lodos (Hu et al. 2020a). En este proceso, el lodo se mezcla con ciertos solventes, que difieren en proporciones para ayudar en la extracción de hidrocarburos de petróleo en el lodo aceitoso.

En general, la extracción por solventes se encuentra entre los mejores métodos de recuperación de petróleo a partir de lodos con un efecto adverso bajo en el medio ambiente y un período de latencia corto (Hu et al. 2020a). El uso de solventes orgánicos podría aumentar el costo de las operaciones, lo que exige la necesidad de identificar alternativas más baratas que sean igual de efectivas (Li et al. 2020b). Sin embargo, para reducir la probabilidad de contaminación secundaria por gases nocivos, se puede usar una unidad de evaporación de vapor para eliminarlos de manera segura (Hui et al. 2020).

### ***2.4.2 Congelación y descongelación.***

Otro método para recuperar el petróleo de los lodos es la congelación- descongelación lo lodos aceitosos de áreas exclusivas tiene composiciones únicas y, como resultado, varios puntos de congelación para los respectivos hidrocarburos. Debido a los cambios cíclicos de temperatura, los cambios en la fase del aceite y el agua eventualmente provocan la desestabilización de la mezcla, lo que permite la separación del aceite de las aguas residuales (Yuan et al. 2021)

### ***2.4.3 Irradiación ultrasónica***

La irradiación ultrasónica aprovecha el hecho de que las ondas ultrasónicas pueden desprender partículas de petróleo crudo de las superficies sólidas a través de la cavitación y la vibración mecánica y, a su vez, alterar las propiedades físicas y el estado de los lodos de petróleo (Hui et al. 2020). Esto se debe principalmente a la disminución de las fuerzas interfaciales entre las fases líquidas (Hua 2020). La irradiación ultrasónica también mejora la agitación de las gotas más pequeñas, por lo que aumenta su frecuencia de colisión para lograr la separación del agua y el petróleo (Hu et al. 2013).

### ***2.4.4 Irradiación por microondas***

La irradiación de microondas es una técnica que emplea radiación con frecuencias que oscilan entre 300 MHz y 3000 GHz, y longitudes de onda: 1 mm–1 m entre frecuencias infrarrojas y de radio (Ossai et al. 2020). Ese poder penetra en las sustancias por el campo electromagnético que interactúa con las moléculas para provocar el calentamiento dieléctrico. El calentamiento por microondas puede provocar el calentamiento individual de los elementos de un material, mientras que la conductividad térmica de un material puede restringir la distribución de la temperatura a los elementos. Como resultado, se puede obtener una reducción en el tiempo de calentamiento con el uso de microondas a menos del 1% en comparación con las técnicas de calentamiento convencionales (Jafarinejad 2017). El principal beneficio del calentamiento por microondas es la capacidad de calentamiento selectivo de los constituyentes. Esta es la razón detrás de las moléculas energizadas y las altas velocidades de reacción, así como la reducción de

la viscosidad del lodo, que provocan la separación de los componentes (Jafarinejad 2017; Wang et al. 2020a).

#### **2.4.5 Pirólisis**

La pirólisis es el tratamiento termoquímico que reduce los contenidos tóxicos en lodos aceitosos a estándares aceptables (Chen et al. 2020; Hu et al. 2020a; Zango 2020). Este método tiene un alto potencial de recuperación y produce subproductos útiles y menos tóxicos, como el aceite de pirólisis que se puede reutilizar como combustible alternativo, productos gaseosos como el gas de síntesis y carbón/cenizas sólidas que se pueden encapsular en hormigón y utilizar en cemento para la construcción. Este proceso ocurre a altas temperaturas (400–600 °C) y en un ambiente anóxico. La pirólisis se ve afectada por las condiciones del proceso, como el tipo de catalizador, la composición del lodo, la temperatura, la presión y el tiempo de reacción (Hui et al. 2020; Raheem et al. 2018)

#### **2.4.6 Flotación por espuma**

La flotación por espuma funciona aumentando la miscibilidad del lodo aceitoso para ayudar en la separación de las diferentes fases de la mezcla. Los tensioactivos también se usan ampliamente en este método para ayudar en la separación como agentes espumantes (Hui et al. 2020).

Algunos de los factores para el rendimiento de recuperación obtenido por este método incluyen pH, salinidad, temperatura, presencia de surfactante, duración del experimento, etc.

Este enfoque de tratamiento de lodos es menos costoso en comparación con algunas de las tecnologías más nuevas; sin embargo, enfrenta el desafío de no ser efectivo cuando maneja lodos altamente viscosos y de alta humedad (Shailubhai 1986). Esto puede retrasar su utilización a mayor escala (Hu et al. 2013; Hui et al. 2020).

#### ***2.4.7 Vertedero.***

El relleno sanitario consiste en colocar una mezcla de lodo aceitoso y tierra en un área designada para permitir la reducción natural de contaminantes. Para evitar la lixiviación y la contaminación del aire y el agua, se utilizan capas gruesas de materiales impermeables para definir los límites del área de tratamiento (Hu et al. 2020a). A menudo se emplea un modo de atrapar el lixiviado que podría drenar para evitar que llegue a las fuentes de agua subterránea (Kamil et al. 2017). El método de relleno sanitario seguro se está empleando más en los países desarrollados para abordar problemas ambientales, aunque está asociado con mayores costos de operación (Bhattacharyya & Shekdar 2003). Muchos estudios se han llevado a cabo utilizando este método. (Agüelmo et al. (2018) evaluó la tasa de biodegradación y la calidad del producto final de PS en vertederos. A nivel microbiano, se observó un aumento de la actividad como responsable del éxito del proceso de biodegradación, de forma que los polifenoles totales mostraron una disminución de más del 71%, mientras que la cromatografía de gases y la espectroscopia infrarroja mostraron una reducción significativa en los valores de TPH después de la biodegradación. 4 meses. Smith et al. (2003) modelaron una alternativa para la eliminación en vertederos de desechos tóxicos peligrosos que contienen radio-226 (Ra-226) utilizando

vertederos. Los resultados indicaron que fue un procedimiento eficaz para degradar esos desechos específicos dejando solo un riesgo insignificante para los sujetos del estudio.

El tratamiento de vertederos requiere menos energía en su aplicación, lo que lo convierte en un proceso de biorremediación más económico y confiable en comparación con el compostaje (Aguelmous et al. 2018). Sin embargo, para proteger las aguas subterráneas durante la eliminación en vertederos, es necesario un revestimiento impermeable para evitar fugas, que se puede monitorear mediante muestreo y pruebas de rutina en pozos para detectar fugas (Dando & Martin 2003; Hu et al. 2020a; Kamil et al. 2017; Mishra et al. 2017).

#### ***2.4.8 Incineración***

La incineración es un proceso de combustión total de lodos de petróleo que se lleva a cabo en un ambiente controlado para ayudar en la eliminación de componentes peligrosos (Das et al. 2018; Hu et al. 2020a; Teng et al. 2020). Algunos de los principales factores que controlan el proceso de combustión incluyen el tiempo, la temperatura y la turbulencia (Bhattacharyya & Shekdar 2003). Los lodos con un alto contenido de agua se someten primero a un tratamiento de deshidratación para eliminar el agua, seguido del procedimiento de incineración a altas temperaturas superiores a 850 °C, a veces con la ayuda de combustibles complementarios como el carbón. Para lograr la descomposición total de los PHC complejos, la temperatura de combustión suele ser superior a 1000 °C, y el proceso también se puede utilizar para generar energía eléctrica (Bhattacharyya & Shekdar 2003; Hu et al. 2020 a; Kamil et al. 2017; Li et al. 2020a). Aunque el método es adecuado para degradar los HAP prioritarios, el alto costo de la energía, junto con los problemas de contaminación del aire asociados, a menudo hacen que el

procedimiento sea menos deseable (Kamil et al. 2017).). Los productos finales (cenizas y gases residuales) de la incineración no pueden liberarse a la atmósfera a menos que estén tratados y libres de componentes nocivos (Raheem et al. 2018; Shailubhai 1986; Teng et al. 2020).

#### ***2.4.9 Desorción térmica***

La desorción térmica, también llamada secado, es un proceso para remover orgánicos y agua de los sólidos. Estos procesos operan a mucha menor temperatura que los incineradores y en ausencia de oxígeno, puesto que no se pretende que exista combustión de los desechos. Las mezclas de orgánicos, agua y sólidos se calientan para separar los volátiles. El agua en el desecho se convierte en vapor y ayuda a despojar compuestos semivolátiles de punto de ebullición alto. Existen muchas variaciones diferentes de este tipo de proceso (Espinoza, 2007).

### **2.5 Centrifugación**

La fuerza centrífuga se produce a través de un medio de rotación de alta velocidad de dispositivos centrífugos para aislar componentes con densidades únicas, es decir, petróleo crudo, agua e impurezas sólidas (Hui et al. 2020). Para reducir la viscosidad del lodo, se utilizan diferentes agentes en la etapa de pretratamiento. Luego se procede a la separación del agua, después de lo cual el petróleo crudo se puede tratar más para eliminar los PHC (Johnson & Affam 2019). Según Wang et al. (2020b), numerosos factores influyen en el proceso centrífugo, como la velocidad de rotación y diferencial, la cantidad de lodo y la dosificación de floculantes. Diferentes investigadores han evaluado el uso de este método a lo largo de los

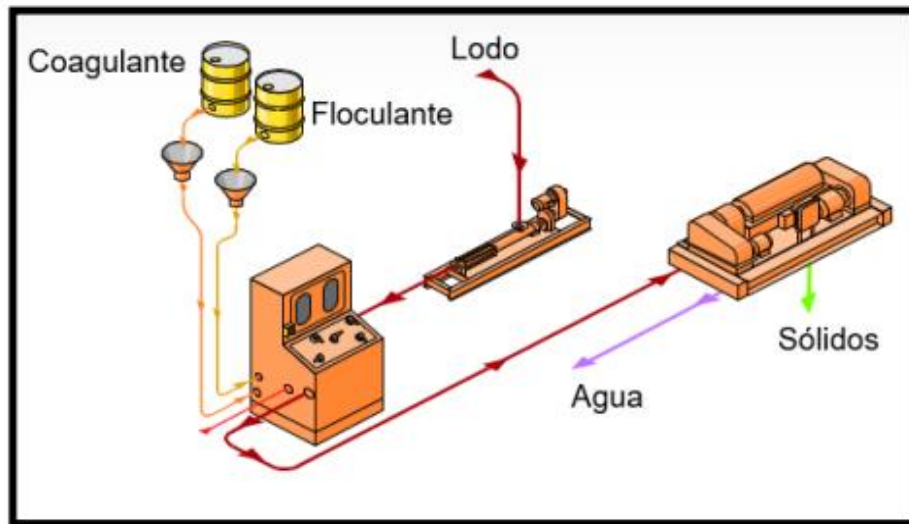
años. Zubaidy y Abouelnasr (2010)) experimentó con la centrifugación para la recuperación de aceite del lodo del fondo del tanque y el producto final tenía un contenido total de hidrocarburos de petróleo (TPH) tan bajo como 1500 ppm, aumentando sus posibilidades de compatibilidad con el proceso de producción. En otro estudio, Huang et al. (2015), utilizando dos tipos de lodos, predijeron la transferencia de partículas durante la centrifugación utilizando un modelo matemático y resolvieron que la técnica puede lograr de manera eficiente la separación de partículas de los lodos de petróleo. Esta tecnología, en comparación con otros métodos de tratamiento, como la extracción por solventes, aún puede sufrir los desafíos del costo, el ruido y la contaminación secundaria. Por lo tanto, se requiere que continúe la investigación y la mejora de agentes de pre acondicionamiento más nuevos, más ecológicos y más eficientes (Hui et al. 2020).

### ***2.5.1 Proceso de deshidratación de borras.***

La deshidratación de borras es el proceso químico-mecánico mediante el cual se lleva a cabo la separación de sólidos presentes en los lodos aceitosos, dando como resultado una torta de sólidos y agua recuperada. Para la separación de fases en lodos aceitosos, se utiliza inicialmente métodos de coagulación y floculación; los cuales desestabilizan cargas eléctricas y aglutinan las partículas. Luego pasan a ser separados mecánicamente mediante centrifugado, donde se produce una separación de sólidos coloidales humectados de hidrocarburos y agua residual. Se puede observar en la figura 1 la esquematización del proceso de deshidratación de lodos aceitosos o borras.

**Figura 1**

*Proceso deshidratación de borras*



### **2.5.2 Coprocesamiento en hornos de clinkerización**

El proceso industrial para la fabricación de cemento comprende la calcinación y fusión de un material compuesto por aproximadamente un 94% de materiales calcáreos, un 4% de arcillas y un 2% de óxidos de hierro y aluminio en un horno rotatorio operado a una temperatura de 1450 °C para sólidos y donde la temperatura de la llama oscila aproximadamente a 2000°C. Este horno produce Clinker (Rocha et al., 2011). Los residuos se procesan en hornos rotatorios porque las condiciones específicas del proceso, como altas temperaturas, un ambiente alcalino, una atmósfera oxidante, una mezcla óptima de gases y productos y un largo tiempo de residencia, suelen ser suficientes para destruir los residuos peligrosos. Sin embargo, el uso de estos combustibles alternativos en la industria del cemento tiene limitaciones, como el volumen del combustible secundario que alimenta el horno y otras limitaciones relacionadas con la seguridad

ambiental. Los combustibles residuales se seleccionan específicamente para que no influyan ni comprometan la calidad de un producto de cemento. Por lo tanto, la utilización de lodos aceitosos se controla estrictamente. Durante la combustión de los residuos, los materiales más volátiles siguen caminos de emisión que son perjudiciales para las propiedades del cemento y la salud ocupacional y ambiental.

En la combustión de residuos, los metales pesados se redistribuyen. Los metales más volátiles (como Hg y Tl) se emiten junto con los gases a través de la chimenea del horno principal, mientras que los metales semivolátiles (Cd, Pb, Sb y Se) y no volátiles (As, Cr, Cu y Ni) generalmente se incorporan al Clinker. Los niveles y características de las emisiones de contaminantes atmosféricos dependen de las características tecnológicas y operativas del proceso industrial, en especial de las características de los hornos rotatorios de Clinker, de la composición química y mineralógica de los insumos y de la composición química de los combustibles. En este sentido, la quema de residuos peligrosos implica una importante carga de emisiones con un alto costo ambiental y social correspondiente.

**Tabla 2.**

*Criterios de aceptación para el coprocesamiento de residuos peligrosos*

<b>Criterio de aceptación Blending</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>	<b>Criterio de aceptación</b>	<b>Criterio de rechazo</b>
	Tamaño	20 mm	>30 mm
	Poder calorífico	≥4500 kcal/Kg	< 4000 kcal/kg
Combustible derivado de residuos	Sumatoria de metales pesados (As, Co, Cu, Cr, Pb, Sn, Sb, Ni, Mn, V, Se, Te	< 2500 ppm	>5000 ppm
	Contenido de mercurio	0 ppm	>10 ppm
	Contenido de cadmio + talio	< 50 ppm	>90 ppm
	Contenido de azufre	< 1 %	>2%

Criterio de aceptación Blending			
Parámetro	Especificación	Criterio de aceptación	Criterio de rechazo
	Humedad	< 15 %	>20 %
	Contenido de cloro	< 0,3 %	> 0,7 %
	Cenizas	< 15 %	N.A
	Manejabilidad	No debe contener materiales cortopunzantes	No debe contener materiales cortopunzantes

Nota. Tomado de: Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento

### 2.5.3 Biorremediación.

La biorremediación consiste en el uso de agentes biológicos, particularmente microorganismos, que catabolizan moléculas específicas, destruyen contaminantes peligrosos o los transforman en otros menos perjudiciales (Fuentes et al., 2014). Esta técnica puede ser aplicada *in situ* cuando es aplicada en el lugar donde se encuentra la contaminación, o *ex situ*, cuando el contaminante es trasladado a una instalación para su tratamiento (Araujo et al., 2016<sup>a</sup>). En comparación con la biorremediación *ex situ*, la biorremediación *in situ* es menos costosa, no necesita la extracción de agua contaminada, ofrece una degradación completa de hidrocarburos del petróleo y no se generan residuos secundarios (Logeshwaran et al., 2018).

La biorremediación utiliza principalmente microorganismos como las bacterias y los hongos, para degradar los hidrocarburos en compuestos inorgánicos no tóxicos y más simples (Agarwal & Liu, 2015). El uso de microorganismos en la biodegradación de hidrocarburos es el principal proceso que actúa en la depuración de ambientes contaminados y en especial de fuentes de agua (Kachienga, Jitendra, & Momba, 2018). Existen varios métodos para la biodegradación de hidrocarburos, pero, en general, es posible usar tres procesos: en primer lugar, la atenuación

natural donde la concentración de contaminantes es reducida aprovechando los recursos naturales. En segundo lugar, la bioestimulación, donde se adicionan nutrientes y un aceptor de electrones al sistema para mejorar su efectividad y acelerar la biodegradación (Gomez, Gaviria, & Cardona, 2009). Finalmente, la bioaumentación o adición de microorganismos (autóctonos o foráneos), también aumenta el rendimiento del proceso de biodegradación (Cerqueria et al., 2011).

### 3. Metodología

#### 3.1 Estado del arte.

La industria petrolera utiliza tanques de almacenamiento en diferentes etapas del manejo y procesamiento del crudo. Los residuos recogidos en los tanques de almacenamiento se denominan fondos de tanques o lodos de tanques. Los fondos de los tanques consisten en sedimentos que se acumulan en los tanques y contienen fracciones de petróleo pesado y otros contaminantes como hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados (Hu et al., 2013).

Los fondos de los tanques de aceite reducen el volumen disponible para almacenamiento; por lo tanto, se eliminan periódicamente (con agua y detergentes). Los depósitos removidos pueden ser eliminados o tratados para recuperar hidrocarburos. El agua de lavado que se genera durante la limpieza de tanques contiene agua, sedimentos, arenas, grasas, aceites, aceite, compuestos orgánicos y especies inorgánicas, como metales (Pucci et al., 2015).

Los procesos de recuperación de hidrocarburos o energía a partir de lodos aceitosos brindan la ventaja de agregar valor a un material que es considerado como un desecho y reducir la cantidad de material que requiere disposición. Las estrategias de gestión de lodos aceitosos con resultados beneficiosos se pueden categorizar como: 1. tecnologías con recuperación de petróleo, y 2. tecnologías para la recuperación de energía sin recuperación de petróleo. Las alternativas con la recuperación de petróleo incluyen la extracción por solventes, la centrifugación, la recuperación de petróleo mejorada con surfactantes y la pirólisis. Las alternativas sin recuperación de aceite, pero con recuperación de energía incluyen la incineración y la codigestión anaeróbica.

### ***3.1.1 Características del lodo del fondo del tanque***

El petróleo crudo se deposita en tanques de almacenamiento y se separa en hidrocarburos de petróleo más pesados y livianos. Los hidrocarburos más pesados se asientan junto con el agua y las partículas sólidas y la mezcla que queda en el fondo del tanque de almacenamiento se denomina lodo aceitoso (Hu et al., 2013). Por lo general, los lodos aceitosos del fondo del tanque contienen aproximadamente un 60 % de aceite, un 25 % de humedad y un 15 % de sólidos (Al-Futaisi et al., 2007). Los sólidos pueden contener metales que se decantan del petróleo crudo durante el almacenamiento. La mayoría de los metales son peligrosos tanto para los humanos como para el medio ambiente.

Por lo general, la fase oleosa del lodo tiene una alta concentración de hidrocarburos aromáticos (25 a 40 %), hidrocarburos saturados (40 a 60 %), resinas (10 a 15 %) y asfáltenos (10 a 15 %) (Speight, 2014).

Los lodos contienen una cantidad considerable de agua, lo que aumenta el volumen a eliminar. Además, el agua residual en el aceite recuperado disminuye su poder calorífico (Motevali, 2020).

La concentración de agua en el lodo aceitoso es comúnmente 30-90%, la concentración de sedimentos, en su mayoría compuestos por calcita, halita, caolinita y cuarzo, es 4-7%, y el resto es compuesta por hidrocarburos de petróleo entre 5 a 60% (da Silva et al., 2012).

### **3.2 Desarrollo experimental**

En este estudio, se realizó análisis a las borras recepcionadas en planta Amir, que provenían de la estación 3 A, del mantenimiento general del tanque número 3415 del campo la Cira infantas, operado por Ecopetrol S.A.

Antes del descargue del vehículo en piscina de almacenamiento número 1, se procedió a tomar una muestra para realizar análisis de BS&W bajo la norma ASTM D-4007-02 y caracterizar el contenido de sedimentos y agua en el laboratorio de planta Amir ver figura 1.

**Figura 2.**

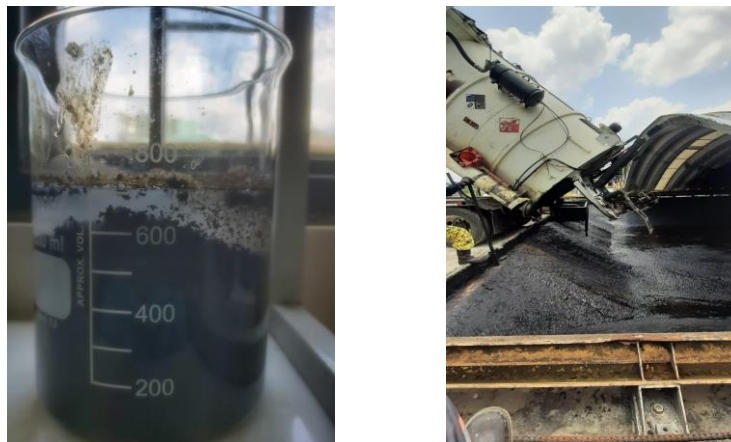
*Muestra lodo aceitoso y análisis de BS&W*



El lodo aceitoso descargado en piscina número 1, se carga a tanque homogeneizador del proceso de deshidratación de borras, donde se mantiene en movimiento con agitación. Se realiza prueba de jarras al lodo aceitoso o borra para determinar dosis de floculante, para la desestabilización de las cargas de los sólidos coloidales ver figura 2.

**Figura 3.**

*Prueba de jarras y descargue de lodo aceitoso*



Este lodo aceitoso es bombeado a centrifuga decanter NX 418 Alfa Laval la cual gira a 1400 rpm, el agua y los sólidos se separan durante la centrifugación por la diferencia de densidades. El subproducto agua es enviado a tratamiento de agua residual y el subproducto sólido es enviado a tratamiento de biorremediación ver figura 3.

#### **Figura 4.**

*Descarga Sólida y líquida proceso deshidratación*



De la descarga sólida de la centrifuga decanter NX 418, se toma muestra del subproducto sólido ver figura 4, para realizar caracterización fisicoquímica de humedad total, materia volátil, cenizas, carbono fijo, poder calorífico superior, azufre y metales pesados. La muestra se envió al laboratorio de combustión de combustibles, de la escuela de ingeniería de recursos naturales y medio ambiente de la Universidad del Valle y al laboratorio AGQ labs.

**Figura 5.**

*Subproducto sólido del proceso deshidratación de lodos aceitosos*



También se realizó análisis de retorta a la muestra de subproducto sólido del proceso de deshidratación, para determinar el contenido de aceite, agua y sólidos ver figura 5, bajo el procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación del instituto americano del petróleo (API).

**Figura 6.**

*Prueba de análisis de retorta*



El objetivo de realizar la caracterización fisicoquímica del subproducto sólido del proceso de deshidratación de lodos aceitosos es determinar si hay, algún potencial energético, que genere una valorización a este residuo, para dar un mejor manejo ambiental y disminuir el volumen de este residuo en las áreas de biorremediación.

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Análisis de agua y sedimentos en lodo aceitoso recibido

La muestra que se tomó del vehículo, se llevó al laboratorio de la planta Amir y se realizó análisis de BS&W.

El BSW corresponde a 10% de Arena, 28.0% de Lodo y 44 % de Agua, que es el 82% de agua y sedimentos, este porcentaje nos indica la necesidad retirar el agua para facilitar la eficiencia de los procesos de biodegradación y disminuir el volumen de lodo aceitoso a tratar.

#### Tabla 3.

*Análisis de BS&W*

Parámetro	Resultado	Unidad
Agua y sedimentos	82	% Volumen

#### 3.3.2 Caracterización Fisicoquímica del subproducto sólido proceso deshidratación de borras.

Para determinar las características del subproducto sólido del proceso de deshidratación de lodos aceitosos, se envió al laboratorio de combustión de combustibles de la Universidad del

Valle una muestra de 2 kilogramos extraídos de la bandeja de descarga sólida de la centrifuga decanter Nx 418 Alfa Laval, ubicada en la planta Amir. A esta muestra se le realizo el análisis fisicoquímico y de metales pesados; con estos parámetros fue posible determinar las propiedades más representativas del subproducto sólido y la naturaleza de los elementos contaminantes como se muestran en las tablas No 4 y 5 ver apéndice 1.

**Tabla 4.**

*Análisis Próximo a subproducto sólido deshidratación de borras*

Parámetro	Análisis Próximo		
	Método de ensayo	Base húmeda	Base seca
Humedad total (% en peso)	ASTM D3302/D3302M - 19	34,66	
Materia Volátil (% en peso)	ASTM D7582-15	38,78	59,35
Cenizas (% en peso)	ASTM D7582-15	26,04	39,86
Carbono fijo (% en peso)	ASTM D3172-13	0,52	0,79
Poder calorífico superior (Kcal/Kg)	ASTM D5865/D5865M - 19	4041,5	6185,8
Poder calorífico superior (BTU/Lb)	ASTM D5865/D5865M - 19	7275	11134
Azufre (% en Peso)	ASTM D4239-18e1. Método A	0,26	0,39

**Tabla 5.**

*Análisis de metales pesados Totales a subproducto sólido de deshidratación de borras*

Metales Pesados Totales			
Parámetro	Resultado	Unidades	Incertidumbre
Cadmio Total	< 5	mg/Kg	±7,06%
Cobre Total	< 5	mg/Kg	±8,72%
Cromo Total	< 5	mg/Kg	±6,68%
Niquel Total	< 5	mg/Kg	±8,06%
Plomo total	< 5	mg/Kg	±9,4%

Metales Pesados Totales			
Parámetro	Resultado	Unidades	Incertidumbre
Zinc Total	< 5	mg/Kg	±9,02%

**3.3.2.1 Análisis de retorta.** También a la muestra del subproducto sólido se le realizó análisis de retorta para determinar el porcentaje de sólido, agua y aceite.

### 3.3.3 Cálculos

Los volúmenes observados en la probeta de aceite y agua, se lo transforma a porcentajes del volumen y el volumen restante hasta llegar a 10 ml es de sólidos, el cual también es llevado a porcentajes.

$$\text{Porcentaje en volumen (\%)}_{\text{Aceite } V_o} = \frac{\text{Volumen de aceite colectado (mL)}}{\text{Volumen de muestra, mL}} * 100$$

$$\text{Porcentaje en volumen (\%)}_{\text{Agua } V_w} = \frac{\text{Volumen de agua colectada (mL)}}{\text{Volumen de muestra, mL}} * 100$$

$$\text{Porcentaje en volumen (\%)}_{\text{sólidos } V_s} = 100 - (V_o + V_w)$$

El porcentaje de volumen de sólidos, pueden ser de los sólidos en suspensión, disueltos, los sólidos volátiles que no se llegan a condensar y los materiales biológicos carbonizados.

**Figura 7.**

*Resultado ensayo de retorta a subproducto sólido proceso deshidratación*



$$\text{Porcentaje en volumen (\%)} \text{ Aceite } V_o = \frac{1,3 \text{ mL}}{10 \text{ mL}} * 100$$

$$V_o = 13 \%$$

$$\text{Porcentaje en volumen (\%)} \text{ Agua } V_w = \frac{3,6 \text{ mL}}{10 \text{ mL}} * 100$$

$$V_w = 36 \%$$

$$\text{Porcentaje en volumen de sólidos (\%)} V_s = 100 - (13 + 36)$$

$$V_s = 51 \%$$

### 3.4 Discusión de resultados

El análisis de los ensayos para caracterizar fisicoquímicamente el subproducto sólido del proceso de deshidratación de lodos aceitosos, determinó un contenido de poder calorífico de 6185,8 Kcal/Kg en base seca, esta característica térmica al compararla con los criterios de aceptación para el coprocesamiento de residuos peligrosos de la tabla número 2, nos muestra que esta energía que posee este residuo se ajusta dentro de sus intervalos de aceptación.

Otro criterio que se evaluó fue el contenido de azufre, el resultado muestra un contenido 0,39 % en peso en base seca, al realizar la comparación con los criterios de aceptación para el coprocesamiento de la tabla número 2 cumple dentro del rango aceptación.

Debido a que los lodos de petróleo se componen principalmente de compuestos orgánicos de alto peso molecular y una alta proporción de materia combustible, se ha reconocido como un recurso energético potencial que se puede reciclar como combustible alternativo para su uso en diversos procesos industriales. La producción de cemento es una de esas industrias; la demanda energética media para la producción de una tonelada de clínker es de aproximadamente 3,52 GJ, lo que corresponde a 0,12 toneladas de carbón con un poder calorífico de 29,31 MJ/kg (E. Mokrzycki, 2003).

También observamos que el material volátil presente en el subproducto sólido del proceso de deshidratación tiene un porcentaje de concentración en peso del 59,35 % y 0,79 % de carbono fijo, debido a que los lodos de petróleo producen altos rendimientos de volátiles (alrededor del 93 % en peso sobre la base de cenizas libres) y muy poco carbono fijo (Zhou. L,2009), tiene el potencial de servir como combustible alternativo.

Otro criterio para evaluar dentro de la tabla número 4 es la humedad total donde el resultado fue de 34,66 % en peso, el contenido de humedad influye en el grado de energía que contiene este subproducto sólido al momento de ser requerido como fuente energética, para efectos con respecto a los criterios de aceptación de coprocesamiento de residuos peligrosos de la tabla número 2, este valor obtenido sobrepasa el límite de aceptación. para su aprovechamiento.

### ***3.4.1 Metales Pesados***

En la Tabla 4 se muestran los resultados de los metales pesados totales que se solicitó para su evaluación. Los resultados indican claramente que en la muestra del subproducto sólido del proceso deshidratación de lodos aceitosos enviada al laboratorio AGQ LABS, no se pudo cuantificar la concentración de estos metales por el método que desarrolla el laboratorio externo. Cabe señalar que la mayoría de estos metales tienen un efecto acumulativo y son especialmente peligrosos.

Revisando las posibles causas en la literatura por las que no se pudo determinar los metales pesados se recomienda aislar los sólidos del aceite, para poder realizar la determinación. Estos metales pesados en lodos aceitosos provienen principalmente del petróleo crudo, fluidos de perforación y suelo.

### ***3.4.2 Composición de subproducto sólido***

El subproducto sólido de proceso deshidratación era de color oscuro y su textura era pastosa. El contenido de humedad se determinó como  $36 \pm 1\%$ . El contenido de sólidos y materia

orgánica fue del  $51\% \pm 1\%$ . El contenido de aceite del subproducto sólido determinado fue del 13 % (V/V) esta determinación se realizó por análisis de retorta.

La composición del lodo aceitoso estuvo dentro del rango informado en varios estudios (Biswal et al., 2009)

#### 4. Conclusiones

La producción de lodos aceitosos o borras en los tanques, cajas API y piscinas de estaciones de recolección de crudo de petróleo es bastante y representa un desafío en el manejo y tratamiento de este tipo de residuos peligrosos tanto por su naturaleza es compleja. El tratamiento de lodos aceitosos se ha convertido en un cuello de botella para el desarrollo sostenible de la industria petrolera.

Los datos indican que el subproducto sólido del proceso de deshidratación de lodos aceitosos considerado tiene un contenido sustancial de hidrocarburos ya que su valor de poder calorífico superior mostro un valor de 6.185,8 Kcal/kg. Este subproducto sólido del proceso de deshidratación se caracterizó por tener concentraciones altas de humedad total y cenizas, pero concentraciones más bajas de azufre y carbono fijo, en comparación con los valores informados en la tabla de criterios de aceptación de coprocesamiento de residuos peligrosos.

Debido a que los lodos de petróleo se componen principalmente de compuestos orgánicos de alto peso molecular y una alta proporción de materia combustible, se ha reconocido como un recurso energético potencial que se puede reciclar como combustible alternativo para su uso en

diversos procesos industriales y de esta forma realizar buena gestión en la disposición para disminuir el volumen de residuos en tratamientos biológicos.

En este estudio el ensayo de determinación de metales pesados totales no cuantifico las concentraciones de cromo, cobre, cadmio, níquel, plomo y zinc, es necesario realizar un duplicado de estos parámetros, ya que en la literatura se han reportado concentraciones de estos contaminantes los cuales son acumulativos en los ecosistemas y en los humanos.

## **5. Recomendaciones**

Realizar una caracterización de compuestos orgánicos volátiles, presentes en estos subproductos y determinar el grado de toxicidad para los recursos aire, suelo y agua.

Realizar varios ensayos de medición para la determinación de metales pesados totales y generar una estadística para dar un mayor grado de confianza en la caracterización de este subproducto, y poder comparar las concentraciones obtenidas con los criterios de aceptación de procesamiento de residuos peligrosos si aplica como combustible alternativo en otras actividades industriales.

Estudiar la opción de vender el residuo a otras industrias que involucren combustibles dentro de su proceso productivo, donde el costo de transporte permita ser más competitivo.

## Referencias Bibliográficas

- Agarwal, A., & Liu, Y. (2015). Remediation technologies for oil-contaminated sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 101(2), 483-490. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.010>.
- Aguelmous A, El Fels L, Souabi S, Zamama M, Yasri A, Lebrihi A, Hafidi M (2018) Biorremediación de lodos de petróleo y eliminación de su toxicidad mediante vertederos en condiciones semiáridas de gunder. *Ecotoxicol Environ Saf* 166:482–487.
- Araujo, J., Yegres, C. F., Barreto, C. G., Antequera, A. A., Depool, B., & Rojas, Y. (2016<sup>a</sup>). Biocatalizadores fúngicos hidrocarbonoclasticos del género *Aspergillus* para la descontaminación de agua con hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPAs).
- Biswal, BK, Tiwari, SN y Mukherji, S. (2009). Biodegradación de aceite en lodos aceitosos de acerías. *Tecnología de biorecursos*, 100 (4), 1700-1703.
- Carbognani, L., Orea, M., & Fonseca, M. (1999). Complex nature of separated solid phases from crude oils. *Energy & fuels*, 13(2), 351-358.
- Carrasco, M., ORE J. —Tratamiento de las borras ácidas producidas en la manufactura de las bases lubricantes del tipo LCT en la refinería de Talara Perú, órgano de la divulgación científica y tecnológica, facultad de ingeniería, Universidad de Carabobo Valencia, Venezuela, volumen 7, número 001, junio 2000.
- Colombia, Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2007). Los Tipos de Petróleo, Informe Quincenal de La SNMPE, 52.

- Da Silva, LJ, Alves, FC y de França, FP (2012). Una revisión de las soluciones tecnológicas para el tratamiento de lodos aceitosos de refinerías de petróleo. *Gestión e investigación de residuos*, 30 (10), 1016–1030. [https://doi.org/ 10.1177/0734242X12448517](https://doi.org/10.1177/0734242X12448517).
- Das, S., Kuppanan, N., Channashettar, VA y Lal, B. (2018). Remediación de lodos aceitosos y suelos contaminados con petróleo de la industria del petróleo: desarrollos recientes y perspectivas futuras. *Avances en microbiología del suelo: tendencias recientes y perspectivas futuras*, 165–177.
- Espinoza, J. (2007). Tratamiento y disposición final de residuos industriales generados en una refinería. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Departamento Académico de Ingeniería Geográfica.
- Fuentes, S., Méndez, V., Aguila, P. et al. Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial communities, and applications. *Appl Microbiol Biotechnol* 98, 4781–4794 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5684-9>.
- Gómez, E, Rani, DA, Cheeseman, CR. (2009) Tecnología de plasma térmico para el tratamiento de residuos: Una revisión crítica. *Revista de materiales peligrosos* 161: 614 – 626.
- Gomez, W., Gaviria, J., & Cardona, S. (2009). Assessment of the biostimulation against bioaugmentation and natural attenuation on contaminated soil with diesel-gasoline mixing. Retrieved from [https:// www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2-077958046867&partnerID=40&md5=d95207cc6c4be559ad8f4c9ab2ba8384](https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2-077958046867&partnerID=40&md5=d95207cc6c4be559ad8f4c9ab2ba8384).
- Hu G, Feng H, He P, Li J, Hewage K, Sadiq R (2020a) Evaluación comparativa del ciclo de vida de los enfoques de tratamiento de lodos aceitosos tradicionales y emergentes. *J Clean Prod* 251:119594

- Hu, G., Li, J., & Zeng, G. (2013). Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review. *Journal of hazardous materials*, 261, 470-490.
- Huang, Q., Wang, J., Qiu, K., Pan, Z., Wang, S., Chi, Y., & Yan, J. (2015). Catalytic pyrolysis of petroleum sludge for production of hydrogen-enriched syngas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(46), 16077-16085.
- Hui, K., Tang, J., Lu, H., Xi, B., Qu, C. y Li, J. (2020). Estado y perspectiva de la recuperación de petróleo a partir de lodos aceitosos: una revisión. *Revista árabe de química*.
- IDEAM, Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, 2019. Bogotá, D.C., 2019. 180 páginas.
- Jafarnejad, S. (2017). 7-gestión de residuos sólidos en la industria del petróleo, tratamiento de residuos de petróleo y control de la contaminación.
- Johnson, O. A., & Affam, A. C. (2019). Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 191-201.
- Kachienga, L., Jitendra, K., & Momba, M. (2018). Metagenomic profiling for assessing microbial diversity and microbial adaptation to degradation of hydrocarbons in two south African petroleum-contaminated water aquifers /631/80/631/326/704/172 /13 /13/89 /82 /82/58 / 82/75 82/80 /82/83 /82/16 article. *Scientific reports*, 8(1), 1-6 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25961-0>.
- Kamil MNAF, Kadir AA, Bujang UH, Hassan HMI (2017) Tratamiento de lodos de petróleo.
- Liu, W., Luo, Y., Teng, Y., Li, Z., & Ma, L. Q. (2010). Bioremediation of oily sludge-contaminated soil by stimulating indigenous microbes. *Environmental geochemistry and health*, 32(1), 23-29.

- Logeshwaran, P., Megharaj, M., Chadalavada, S., Bowman, M., & Naidu, R. (2018). Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: An overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk- based remediation approaches. *Environmental Technology and Innovation*, 10,175-193. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.001> .
- Mirghaffari, N. (2017, April). Treatment and recycling of oily sludges produced in the petroleum industry. In 2017 International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries: Kurdistan Region of Iraq as a Case Study (EIOGI) (pp. 1-2). IEEE.
- Mokrzycki, E. y Uliasz-Bocheńczyk, A. (2003). Combustibles alternativos para la industria del cemento. *Energía aplicada*, 74 (1-2), 95-100.
- Ossai IC, Ahmed A, Hassan A, Hamid FS (2020) Remediación de suelos y aguas contaminados con hidrocarburos de petróleo: una revisión. *Medio ambiente Technol Innov* 17:100526.
- Pinheiro, B. C. A., & Holanda, J. N. F. (2013). Reuse of solid petroleum waste in the manufacture of porcelain stoneware tile. *Journal of Environmental management*, 118, 205-210.
- Raheem A, Sikarwar VS, He J, Dastyar W, Dionysiou DD, Wang W, Zhao M (2018) Oportunidades y desafíos en el tratamiento sostenible y la reutilización de recursos de lodos de depuradora: una revisión. *Ingeniería química J* 337: 616–641.
- Rahman, KS, Rahman, TJ, Kourkoutas, Y., Petsas, I., Marchant, R. y Banat, IM (2003). Biorremediación mejorada de n-alcano en lodos de petróleo utilizando un consorcio bacteriano modificado con ramnolípidos y micronutrientes. *Tecnología de biorecursos* , 90 (2), 159-168.

- Sparks, B. D., Kotlyar, L. S., O'Carroll, J. B., & Chung, K. H. (2003). Athabasca oil sands: effect of organic coated solids on bitumen recovery and quality. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 39(3-4), 417-430.
- Wang, J., Yin, J., Ge, L., Shao, J., & Zheng, J. (2010). Characterization of oil sludges from two oil fields in China. *Energy & fuels*, 24(2), 973-978.
- Yan, P., Lu, M., Yang, Q., Zhang, HL, Zhang, ZZ y Chen, R. (2012). Recuperación de petróleo de lodos aceitosos de refinería utilizando *Pseudomonas* productoras de biosurfactantes ramnolípidos. *Tecnología de biorecursos* , 116 , 24-28.
- Zhang, J., Li, J., Thring, RW, Hu, X. y Song, X. (2012). Recuperación de aceite de lodos aceitosos de refinería mediante ultrasonidos y congelación/descongelación. *Revista de materiales peligrosos*, 203, 195-203.
- Zhou, L., Jiang, X. y Liu, J. (2009). Características de la combustión de lodos aceitosos en lechos fluidizados circulantes. Revista de materiales peligrosos, 170 (1), 175-179.*

## Apéndices

## Apéndice A.

Informe N°: 029-22Fecha emisión (a-m-d): 2022-04-25**Información del solicitante:**

**Cliente:** HELBERT MAURICIO DELGADO FETECUA  
**Dirección cliente:** Calle 13 # 2A-05  
**Ciudad - Departamento:** Nobsa-Boyacá

**Información del ensayo**

**Tipo de muestra:** Varios  
**Identificación ítem de ensayo:** Sólido Salida Decanter NX418  
**Fecha recepción (a-m-d):** 2022-04-05  
**Fecha inicio de análisis (a-m-d):** 2022-04-05  
**Fecha final de análisis (a-m-d):** 2022-04-25

**Notas**

-Las celdas en gris corresponden a actividades de ensayo o cálculo no realizadas.

- Las condiciones ambientales durante la realización de los ensayos son: temperatura área de preparación: 23 °C; temperatura área de ensayos: 20 °C; presión atmosférica: 0,9 bares. Estos valores cumplen con los requerimientos para el equipamiento utilizado.

- Los resultados reportados corresponden exclusivamente a la muestra suministrada por el cliente y sometida a ensayo en las instalaciones del Laboratorio Combustión Combustibles (LCC) en la Universidad del Valle.

-Sin la aprobación del Laboratorio Combustión Combustibles (LCC) este informe no debe ser reproducido, excepto cuando se reproduce de forma total.

**Aprobado por:**

Firmado digitalmente por  
FRANCISCO JAVIER  
VELASCO SARRIA  
Fecha: 2022.04.25 15:42:00  
-05'00'

PhD Francisco Javier Velasco Sarria

Director Técnico

Laboratorio Combustión Combustibles (LCC)

**INFORME DE ENSAYOS**



LABORATORIO

Identificación ítem de ensayo en el LCC: SV013

Análisis Próximo			
Parámetro	Método de ensayo	Resultados	
		Base húmeda	Base seca
Humedad Total (% en peso)*	ASTM D3302/D3302M - 19	34,66	
Materia Volátil (% en peso)*	ASTM D7582-15	38,78	59,35
Cenizas (% en peso)*	ASTM D7582-15	26,04	39,86
Carbono Fijo (% en peso)*	ASTM D3172-13	0,52	0,79
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)*	ASTM D5865/D5865M - 19	4041,5	6185,8
Poder Calorífico Superior (BTU/lb)*	ASTM D5865/D5865M - 19	7275	11134
Azufre (% en peso)*	ASTM D4239-18e1. Método A	0,26	0,39

Análisis Elemental			
Parámetro	Método de ensayo	Resultados	
		Base húmeda	Base seca
Humedad Total (% en peso)*	ASTM D3302/D3302M - 19	34,66	
Cenizas (% en peso)*	ASTM D7582-15	26,04	39,86
Carbono (% en peso)*	ASTM D 5373-21. Método A.		
Hidrogeno (% en peso)*	ASTM D 5373-21. Método A.		
Nitrogeno (% en peso)*	ASTM D 5373-21. Método A.		
Azufre (% en peso)*	ASTM D4239-18e1. Método A	0,26	0,39
Oxígeno (% en peso)*	ASTM D3176-15		

Parámetro	Método de ensayo	Base húmeda	Base seca
Poder Calorífico Inferior (BTU/lb)*	Calculado		

Observaciones:

El tipo de muestra "Varios" hace referencia a toda muestra sólida diferente de carbón y bagazo.

Fin del informe de ensayos



INFORME DE ENSAYO

Nº de Referencia:	5-22/016804	Registrada en:	AGQ Prodycon	Cliente (*):	HELBERT MAURICIO DELGADO FETECUA
Análisis:	CO01-00025325-1	Centro Análisis:	AGQ Prodycon	Domicilio (*):	CL 3 2 A 05 BRR MAZARETH
Tipo Muestra:	SEDIMENTOS	Fecha Recepción:	29/03/2022	Contrato:	QMT-PR220300083
Fecha Inicio:	18/04/2022	Fecha Fin:	18/04/2022	Cliente 2º(*):	---
Descripción(*):	SUBPRODUCTO SÓLIDO DE DESCARGA DE CENTRIFUGA DECANTER, PROCESO DEWATERING				
Fecha/Hora Muestreo:	24/03/2022	Muestreado por:	Client (*)		

A continuación se exponen el Informe de Ensayo y Anexo Técnico asociados a la muestra, en los cuales se pueden consultar toda la información relacionada con los ensayos realizados.

Los Resultados emitidos en este informe, no han sido corregidos con factores de recuperación. Siguiendo el protocolo recogido en nuestro manual de calidad, AGQ guardará bajo condiciones controladas la muestra durante un periodo determinado después de la finalización del análisis. Una vez transcurrido este periodo, la muestra será eliminada. Si desea información adicional o cualquier aclaración, no dude en ponerse en contacto con nosotros.

PAULA ANDREA BOHORQUEZ  
MEDINA

FECHA EMISIÓN: 26/04/2022

OBSERVACIONES (\*):



INFORME DE ENSAYO

Nº de Referencia:	S-22/016804	Tipo Muestra:	SEDIMENTOS
Descripción[*]:	SUBPRODUCTO SÓLIDO DE DESCARGA DE CENTRÍFUGA DECANTER, PROCESO DEWATERING	Fecha Fin:	18/04/2022

RESULTADOS ANALÍTICOS

Parámetro	Resultado	Unidades	Incert
<b>Metales Totales</b>			
Cadmio Total	< 5,00	mg/kg	±7,06%
Cobre Total	< 5,00	mg/kg	±8,72%
Cromo Total	< 5,00	mg/kg	±6,68%
Níquel Total	< 5,00	mg/kg	±8,06%
Plomo Total	< 5,00	mg/kg	±5,4%
Zinc Total	< 5,00	mg/kg	±9,02%

Nota: Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Las incertidumbres de los parámetros acreditados están calculadas y a disposición del cliente. AGQ no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, asociada a la toma de muestras y a otros datos descriptivos, marcados con [\*]. A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. La incertidumbre aplicada al resultado no aplica para valores menores al Límite de Cuantificación (L.C). La Incert Exp (U) ha sido reportada con un Factor de Cobertura k= 2, para un nivel de confianza apros del 95%.

[\*] Parámetro No Acreditado por IDGAM



INFORME DE ENSAYO

Nº de Referencia:	S-22/016804	Tipo Muestra:	SEDIMENTOS
Descripción(*):	SUBPRODUCTO SÓLIDO DE DESCARGA DE CENTRIFUGA DECANTER, PROCESO DEWATERING	Fecha Fin:	18/04/2022

**ANEXO TÉCNICO**

Parámetro	PNT	Técnica	Ref. Norma	Lim Cuantif/ Detec (K)
<b>Metales Totales</b>				
Cadmio Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Cobre Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Cromo Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Niquel Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Plomo Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Zinc Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg

(\*) Lim Cuantif es el valor a partir del cual se detecta la presencia de un elemento en la muestra. El Lim Detec es el valor a partir del cual se detecta la presencia de un elemento en la muestra.



INFORME DE ENSAYO

Nº de Referencia:	S-22/D16804	Tipo Muestra:	SEDIMENTOS
Descripción(*):	SUBPRODUCTO SÓLIDO DE DESCARGA DE CENTRIFUGA DECANTER, PROCESO DEWATERING	Fecha Fin:	18/04/2022

ANEXO TÉCNICO

Parámetro	PNT	Técnica	Ref. Norma	Lim Cuantif/ Detec (µg)
<b>Metales Totales</b>				
Cadmio Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Cobre Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Cromo Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Niquel Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Plomo Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg
Zinc Total	NTC 11464 / EPA 200.7 Metales en suelos	Espect ICP-OES		5,00 mg/kg

\*El presente informe es un informe de laboratorio y no debe ser utilizado como evidencia legal. El laboratorio no es responsable de los resultados obtenidos en el presente informe.

**Apéndice B****ANÁLISIS DE RETORTA****Serie OFI 165-00 - Tamaño 10 ml****Serie OFI 165-80 - Tamaño 20 ml****Serie OFI 165-14 - Tamaño 50 ml**

La retorta provee un medio para la separación y medición de los volúmenes de agua, aceite y sólidos contenidos en una muestra de fluidos de perforación. Se calienta un volumen conocido de muestra, hasta vaporización de los componentes líquidos, los cuales son luego condensados y colectados en una probeta graduada. Los volúmenes líquidos se determinan de la lectura de las fases oleosa y acuosa en la probeta graduada. El volumen total de sólidos, tanto los suspendidos como los disueltos, se obtiene por diferenciación del volumen total de muestra versus el volumen final de líquido colectado. Son necesarios cálculos para determinar el volumen de los sólidos suspendidos, debido a que ningún sólido disuelto será retenido en la retorta. También, se pueden calcular los volúmenes relativos a los sólidos de baja gravedad específica y materiales densificantes.

**EQUIPAMIENTO:**

*Recipiente para muestra:* Capacidad 10 ml, 20 ml o 50 ml.

*Condensador:* De masa suficiente para enfriar los vapores de agua e hidrocarburo por debajo de su temperatura de vaporización, previo a que abandonen la cámara de condensación. Los condensadores OFITE para 20 y 50 ml están ajustados con una conexión Ultra-Torr, para prevenir el raspado de la rosca del condensador y retardar la evaporación. Mantenga el O-Ring de la conexión Ultra-Torr lubricado con una pequeña cantidad de grasa.

*Elemento de Calentamiento:* Potencia en Watt suficiente para producir una elevación de temperatura de la muestra, por arriba de sus puntos de vaporización,

	dentro de especificaciones API, sin producir la fusión y volatilización de los sólidos.
<i>Termostato:</i>	Capacidad limitante de la temperatura de la retorta hasta $930 \pm 70^{\circ}\text{F}$ ( $500 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ). <b>Las retortas OFITE están calibradas para calentar una muestra entre 930 - 1000°F, según especificaciones API. Cualquier ajuste manual realizado sobre el termostato será peligroso y anulará la garantía de fábrica.</b>
<i>Receptáculo para líquido:</i>	Probeta graduada, transparente e inerte al hidrocarburo, agua y a temperaturas de hasta $90^{\circ}\text{F}$ ( $32^{\circ}\text{C}$ )
<i>Lana de acero fina:</i>	N°000 Lana de Acero. Nota: No se recomienda el uso de Lana de Acero Líquida
<i>Grasa:</i>	Never-Seez®. Se usa para el sellado de la rosca del receptáculo y como lubricante a altas temperaturas.
<i>Perforador manual T:</i>	Para limpieza de la cámara de la retorta y del pasaje del condensador
<i>Limpiadores de cañería:</i>	Para limpieza de la cámara de la retorta y del pasaje del condensador
<i>Espátula:</i>	Diseñada para entrar completamente dentro de las dimensiones del receptáculo de muestra.

**Deberían seguirse los siguientes lineamientos, para asegurar una segura operación de las retortas:**

1. Limpie y seque la cámara de la retorta y el condensador, especialmente dentro del receptáculo de la muestra de lodo, tapa y del pasaje del condensador (tubo de descarga). Limpie la rosca del receptáculo de muestra con un cepillo de alambre. Use una espátula, la punta de un sacacorchos o una navaja para disgregar los sólidos dentro del receptáculo de la muestra. Debería usarse un limpiador de tubería o una herramienta rígida (perforador manual T) para perforar y sacar cualquier residuo fuera del tubo de descarga.  
**Asegúrese que el tubo de descarga y el orificio en la tapa de la cámara de muestra de lodo estén absolutamente limpios.**
2. El ensamble completo debería enfriarse a menos de  $100^{\circ}\text{F}$  ( $37.8^{\circ}\text{C}$ ) después de cada uso.
3. Las roscas en la retorta deberían inspeccionarse visualmente antes de cada uso, para determinar signos de daño.
4. La lana de acero debería cambiarse luego de cada ensayo, para prevenir el depósito de sólidos.
5. Las retortas usadas en operaciones offshore deberían cambiarse cada 6 meses para su examen y limpieza.

**PROCEDIMIENTO:**

1. Recolecte una muestra representativa del fluido de perforación y hágala pasar a través de la malla del embudo Marsh, para remover cualquier material de mayor tamaño, como ser cuttings, materiales de pérdida de circulación, u otro desperdicio.
2. Registre la temperatura de la muestra. Esta debería estar dentro de los 10°F de la temperatura a la cual se determinó la densidad del lodo.
3. Si la muestra contiene burbujas de gas o de aire, agregue de 2 - 3 gotas de agente antiespumante, a una muestra de 300 ml de lodo. Agite lentamente por 2 o 3 minutos, para permitir el desprendimiento de los gases atrapados. El entrapamiento de gas o de aire resultará en medidas de alto contenido de sólidos de retorta, las cuales serán erróneas, debido a que el gas y el aire entrapados redujeron inicialmente el volumen de muestra líquida.
4. Empaque un rollo de lana de acero N°000 dentro de la cámara, hasta aproximadamente 3/16 plg por arriba de la rosca interna de la cámara. Tal como lo indica la experiencia, use sólo la cantidad suficiente de lana de acero para prevenir una ebullición sobre los sólidos dentro del receptáculo de líquido.
5. Usando una jeringa limpia, lentamente llene el receptáculo de la retorta con una muestra no aireada, para evitar el entrapamiento de aire. Golpee ligeramente los costados del receptáculo de la muestra para expeler cualquier aire presente, y coloque la tapa sobre el receptáculo. Rote la tapa para obtener un apropiado calce y asegúrese que una pequeña cantidad de exceso de fluido salga por el orificio de la tapa. Limpie el exceso de lodo y cualquier sólido que se halla acumulado en el orificio de la tapa.
6. Lubrique la rosca completa del recipiente de muestra, con una ligera capa de Never-Seez®. Esto prevendrá la pérdida de vapores a través de la rosca y también facilitará el desarmado del equipo al final del ensayo.
7. Cuidadosamente, ajuste manualmente el receptáculo de retorta en la cámara de retorta y conecte el ensamble al condensador. Para las retortas de 20 y 50 ml, inserte cuidadosamente el tubo de la cámara de retorta dentro en la conexión Ultra-Torr y ajuste manualmente. Para las retortas de 10 ml, la cámara deberá roscarse en el condensador. Tenga cuidado de no sobreajustar y dañar las roscas en el condensador. Coloque la cámara dentro de la camisa de calentamiento y cierre la tapa de aislación.
8. Coloque un receptáculo limpio y seco para líquido, debajo del tubo de descarga del condensador. La longitud de este receptáculo podría requerir que este se encuentre en ángulo con respecto a la retorta o soportado de los lados del borde de la mesa de trabajo.

9. Conecte la retorta y observe el líquido que sale del condensador. Continúe calentando por 10 minutos más allá del tiempo transcurrido, luego de que no se ha recolectado más condensado. Si el lodo, como tal, ebulle sobre el tubo de recolección, el ensayo deberá repetirse. Empaque el cuerpo de la retorta con una mayor cantidad de lana de acero y corra nuevamente el ensayo. Permita que este transcurra por al menos 45 minutos.
10. Remueva el recolector de líquidos y permita que se enfríe. Lea y registre los volúmenes (o porcentaje volumétrico) de: 1) volumen de líquido total; 2) volumen de aceite; 3) volumen de agua, luego de que este ha sido enfriado a temperatura ambiente. Si se presenta una interfase en forma de emulsión entre las fases de aceite y de agua, un simple calentamiento de la interfase podría romper dicha emulsión. Una forma de realizar esto es remover la retorta ensamblada de la camisa de calentamiento, sujetando el condensador. Cuidadosamente, caliente el tubo receptor de líquidos a lo largo de la banda de emulsión por un suave contacto del receptor por un corto intervalo de tiempo, con la cámara caliente de la retorta. Evite la ebullición del líquido. Luego de que la interfase de emulsión se ha roto, permita que el receptor se enfríe y lea el volumen de agua en el punto más bajo del menisco.
11. Desconecte la retorta y permita que se enfríe, previo a su limpieza. No use agua fría para tratar de enfriar rápidamente la cámara.

### **Instrucciones para el Controlador de Temperatura - Retortas OFI de 20 y 50 ml:**

#### **Retorta de 20 ml:**

Para establecer la temperatura sobre la retorta OFI de 20 ml con el controlador de temperatura electrónico, presione y mantenga hacia abajo el botón "set" mientras está presionando el botón para arriba "Λ" o hacia abajo "V", y establezca la temperatura deseada. El rango de temperatura está entre 32°F (0°C) y 950°F (509°C), a menos que se requiera otro rango en el momento de la compra.

#### **Retorta de 50 ml:**

Para establecer la temperatura sobre la retorta OFI de 50 ml con el controlador de temperatura electrónico, presione hacia arriba el botón "Λ" o hacia abajo el botón "V". Lubrique las roscas en el receptáculo de muestra con una ligera capa de Never-Seez®. Esto prevendrá la pérdida de vapores a través de las roscas y facilitará el desarmado del equipo al final del ensayo.

En el manual del operador enviado con la retorta, se incluye información adicional en relación al control de temperatura. También puede requerírsele contactando a la división técnica de OFITE.

**CÁLCULOS:**

Los volúmenes medidos (ml) de hidrocarburo y agua son convertidos en porcentajes volumétricos, en base al volumen de lodo que hemos colocado en el receptáculo de la retorta.

$$\text{Porcentaje en Volumen (\%)} \text{ Aceite} = V_o = \frac{100 (\text{Volumen de Aceite Colectado, ml})}{\text{Volumen de Muestra, ml}}$$

$$\text{Porcentaje en Volumen (\%)} \text{ Agua} = V_w = \frac{100 (\text{Volumen de Agua Colectada, ml})}{\text{Volumen de Muestra, ml}}$$

$$\text{Porcentaje en Volumen (\%)} \text{ Sólidos} = V_s = 100 - (V_o + V_w)$$

Nota: El porcentaje volumétrico de sólidos incluye tanto los sólidos suspendidos (material densificante, etc.) como los sólidos disueltos (por ej., sales solubles). Este porcentaje volumétrico representará el total de los sólidos suspendidos, sólo si el lodo es del tipo agua dulce no tratado.

Para encontrar el porcentaje volumétrico de sólidos suspendidos y relacionarlos a los volúmenes relativos de sólidos de baja gravedad específica y materiales densificantes, se deberán realizar cálculos, una precisa medición del peso del lodo y concentración de cloruros.

$$V_{ss} = V_s - V_w \frac{\text{concentración de Cloruros, mg/lit}}{1680000 - 1.21 (C_s)}$$

Donde,  
 V<sub>ss</sub> : Porcentaje volumétrico de sólidos suspendidos  
 C<sub>s</sub> : Concentración de cloruros, mg/lit

El porcentaje volumétrico de sólidos de baja gravedad específica, V<sub>g</sub> se calcula de la siguiente manera:

$$V_{lg} = \frac{1}{P_b - P_{lg}} [100 P_f + (P_b - P_f) V_{ss} - 12 W_m - (P_f - P_o) V_o]$$

Donde,

- $V_{lg}$  : Porcentaje volumétrico (%) de los sólidos de baja gravedad específica  
 $W_m$  : Peso del lodo, ppg  
 $P_f$  : Densidad del filtrado,  $gr/cm^3$   
 $P_b$  : Densidad del material densificante,  $gr/cm^3$   
 $P_{lg}$  : Densidad de los sólidos de baja gravedad,  $gr/cm^3$  (use 2.6 si desconoce este valor)  
 $P_o$  : Densidad del aceite,  $gr/cm^3$  (use 0.84 si desconoce este valor)

Porcentaje volumétrico (%) de material densificante ( $V_b$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$V_b = V_{ss} - V_{lg}$$

Las concentraciones de los sólidos de baja gravedad específica, material densificante y sólidos suspendidos, pueden calcularse de la siguiente manera:

$$C_{lg} = 3.49 (P_{lg}) \times (V_{lg})$$

$$C_b = 3.49 (P_b) \times (V_b)$$

$$C_{ss} = C_{lg} + C_b$$

Donde,

$C_{lg}$  : Concentración de sólidos de baja gravedad, lb/bbl

$C_b$  : Concentración de material densificante, lb/bbl

$C_{ss}$  : Concentración de sólidos suspendidos, lb/bbl