

**CARACTERIZACIÓN DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN DE POZOS
PETROLEROS PARA EL ANÁLISIS DE SU TRATAMIENTO Y SUS POSIBLES
APLICACIONES**



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

AUTOR

DAMIÁN ANDRÉS VILLAMIL SACRISTÁN

JUAN SEBASTIÁN CASTRO ARDILA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERIA CIVIL

Director:

INGENIERO JUAN CARLOS CASTRO

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ, 05 OCTUBRE 2020**

CARACTERIZACIÓN DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN DE POZOS
PETROLEROS PARA EL ANÁLISIS DE SU TRATAMIENTO Y SUS POSIBLES
APLICACIONES

1102191 DAMIÁN ANDRÉS VILLAMIL SACRISTÁN
1101855 JUAN SEBASTIÁN CASTRO ARDILA

INGENIERO JUAN CARLOS CASTRO



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., MES AGOSTO DE 2020

Nota aceptación

Firma de tutor

Firma de jurado 1

Firma de jurado 2

Bogotá D. C., mes agosto de 2020

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo que se refleja en este trabajo de grado lo dedicamos a nuestros padres cuyo apoyo y paciencia hicieron posible todo esto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros profesores de la Universidad Militar Nueva Granada, quienes nos guiaron y acompañaron en el proceso y camino hacia nuestra principal meta que es la obtención de nuestro título profesional.

A nuestro tutor y guía para el desarrollo de este trabajo de grado el Ingeniero Juan Carlos Castro quien con su paciencia y sus bastos conocimientos nos brindo un gran aporte para nuestra investigación.

Por ultimo y mas importante, agradecemos a nuestros padres por el apoyo incondicional brindado a lo largo de toda nuestra vida y en especial a lo largo de este proceso académico que culmina.

Contenido

| | |
|--|----|
| Lista de ilustraciones | 8 |
| Lista de tablas..... | 9 |
| GLOSARIO | 10 |
| RESUMEN..... | 12 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. PROBLEMA..... | 15 |
| 1.1. IDENTIFICACIÓN..... | 15 |
| 1.2. DESCRIPCIÓN..... | 15 |
| 1.3. PLANTEAMIENTO..... | 16 |
| 2. DELIMITACION | 17 |
| 2.1. CONCEPTUAL | 17 |
| 3. OBJETIVO..... | 17 |
| 3.1. OBJETIVO GENERAL | 17 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 17 |
| 4. ANTECEDENTES..... | 18 |
| 4.1. INTERNOS | 18 |
| 4.2. EXTERNOS..... | 19 |
| 5. JUSTIFICACION..... | 20 |
| 6. ESTADO DEL ARTE..... | 20 |
| 7. MARCO REFERENCIAL | 22 |
| 7.1. MARCO TEÓRICO | 22 |
| 7.1.1. Diseño de Perforación..... | 22 |
| 7.1.2. Etapas de la perforación | 23 |
| 7.1.3. Equipos de Perforación..... | 23 |
| 7.1.4. Clasificación de Fluidos de Perforación | 25 |
| 7.1.5. Funciones del Fluido de Perforación | 26 |
| 7.1.6. Recortes de Perforación..... | 27 |
| 7.1.7. Métodos de Tratamiento de los Recortes de Perforación | 31 |
| 7.1.8. Pretratamiento..... | 31 |
| 7.1.9. Tratamientos térmicos..... | 32 |
| 7.1.10. Tratamientos biológicos | 35 |
| 7.1.11. Tratamientos físicos..... | 39 |
| 7.1.12. Tratamientos químicos..... | 41 |
| 7.1.13. Otros Tratamientos | 43 |
| 7.2. MARCO LEGAL..... | 44 |
| 7.2.1. Normativa nacional relacionada con recortes de perforación..... | 44 |
| 6.3. MARCO AMBIENTAL | 46 |
| 6.3.1. Composición..... | 47 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7. | METODOLOGIA..... | 47 |
| 8. | ENSAYOS | 48 |
| 8.1. | Humedad Natural (I.N.V.E – 122 – 13)..... | 48 |
| 8.2. | Determinación del límite líquido (I.N.V.E – 125 – 13)..... | 49 |
| 8.3. | Determinación limite plástico e índice de plasticidad (I.N.V.E – 126 – 13) 50 | |
| 8.4. | Análisis granulométrico (I.N.V.E – 123 – 13)..... | 51 |
| 8.5. | Permeabilidad (I.N.V.E – 130 – 13)..... | 53 |
| 8.6. | Descripción e Identificación de Suelos (Procedimiento Visual y manual) (I.N.V.E – 102 – 13) | 55 |
| 8.7. | Determinación de la Gravedad Específica de las Partículas Sólidas de los Suelos y del Llenante Mineral, Empleando un Picnómetro con Agua. (I.N.V. E – 128 – 13) | 56 |
| 8.8. | Consolidación Unidimensional de Suelos (I.N.V. E – 151 – 13) | 58 |
| 8.9. | Corte Directo en Condición Consolidada Drenada (I.N.V. E – 154 – 13) 60 | |
| 8.10. | Sistema de clasificación de los suelos SUCS | 61 |
| 9. | DISCUSION..... | 63 |
| 9.1. | GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO..... | 63 |
| 9.2. | TRATAMIENTOS TÉRMICOS..... | 63 |
| 9.3. | TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS | 64 |
| 9.4. | TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS..... | 64 |
| 9.5. | DISPOSICIÓN FINAL | 65 |
| 9.6. | USOS Y APLICACIONES | 65 |
| 10. | CONCLUSIONES | 66 |
| 11. | RECOMENDACIONES | 67 |
| 12. | BIBLIOGRAFIA | 68 |

Lista de ilustraciones

| | |
|--|----|
| Ilustración 1: Sarta de Perforación | 23 |
| Ilustración 2: Sistema de Circulación de Fluidos. | 25 |
| Ilustración 3: Zaranda | 29 |
| Ilustración 4: Hidrociclones. | 29 |
| Ilustración 5: Desorción Termo-Mecánica..... | 34 |
| Ilustración 6: Biopilas. | 38 |
| Ilustración 7: Corte Piscina de Landfarming..... | 39 |
| Ilustración 8: Estabilización Cemento y Cal. | 42 |
| Ilustración 9: Fitoremediacion..... | 44 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Fluidos de Perforación..... | 26 |
| Tabla 2: Funciones de los Fluidos de Perforación..... | 27 |
| Tabla 3:Requisitos Sobre la Masa Mínima de los Especímenes de Ensayo. | 48 |
| Tabla 4: Tamaño de Tamices. | 52 |
| Tabla 5: Tamaño de Cilindros. | 54 |
| Tabla 6: Tamaño de Partículas. | 56 |
| Tabla 7: Masa Según Picnómetro. | 57 |
| Tabla 8: Simbología SUCS. | 62 |

GLOSARIO

ACUIFEROS: Zona del terreno que contiene agua.

ANALISIS GRANULOMETRICO: Estudio de la distribución de los diferentes tamaños de partículas de un suelo.

BACTERIAS: Microorganismos Procariotas unicelulares que presentan un tamaño por lo general entre 0.5 y 5 micrómetros además de tener diferentes formas.

COMPOSICION: Acción de juntar varias cosas con un orden específico con el fin de obtener una sola o construir algo.

CONSISTENCIA: Facilidad de un suelo para deformarse con o sin presencia de agua.

CONTAMINANTE: Sustancia introducida en el medio ambiente que tiene efectos no deseados o que afecta negativamente la utilidad de un recurso.

DENSIDAD: Se define como peso por unidad de volumen.

DIESEL: Gasóleo derivado del petróleo compuesto por un 75% de hidrocarburos saturados y el 25% restante de hidrocarburos aromáticos.

FLUIDO DE CONTROL (LODO DE PERFORACIÓN): Fluidos o mezclas de fluidos y sólidos bien sea en mezclas, emulsiones, o por suspensión; utilizados para las perforaciones en pozos petroleros.

GRAVEDAD ESPECÍFICA: Relación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua a cuatro grados centígrados.

HIDROCARBUROS: Compuesto químico, formado por hidrógeno y carbono.

HUMEDAD: Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que se encuentre presente en la superficie o dentro de un cuerpo.

INDICE DE PLASTICIDAD: Rango en el cual un suelo tiene un comportamiento plástico.

LIMITE PLASTICO: contenido de agua en un suelo el cual se encuentra entre un estado plástico y semisólido, generalmente se representa de manera porcentual.

LIXIVIADOS: Líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido.

LUBRICANTES: Sustancia grasa o aceitosa que se aplica sobre las piezas de un equipo o maquinaria con el fin de que el rozamiento o fricción disminuya o sea más suave.

MATERIA ORGANICA: Grupo de células animales o vegetales, total o parcialmente descompuestas por la acción de microorganismos.

POZO PETROLERO: Obra de ingeniería con el fin de poner en contacto u yacimiento de hidrocarburos con la superficie.

RECORTES DE PERFORACION: Partículas sólidas que son generadas por la acción de la trituración de la broca en el proceso de perforación de un pozo petrolero.

RESIDUOS: Material que resulta de la descomposición o destrucción de una cosa.

SARTA DE PERFORACIÓN: tubos de diferentes secciones que son bajadas a través del pozo para ir perforando mediante fuerza rotativa.

SOLVENTE: Componente de una solución, es la sustancia que disuelve al soluto.

VOLATIZAR: Hacer pasar un cuerpo del estado sólido o líquido a estado gaseoso.

YACIMIENTO: Lugar en el que se localizan de forma natural minerales, rocas o fósiles cuando pueden ser posible si explotación o extracción.

ZARANDAS: Equipo utilizado para separar elementos solidos de los lodos de perforación en la salida del pozo.

RESUMEN

En la actualidad la industria petrolera es una de las de mayor crecimiento a nivel mundial, en Colombia aproximadamente se producen 900.000 barriles de crudo por día (bdp). Esta práctica genera enormes cantidades de residuos producto de las perforaciones debido a los altos volúmenes de material que se utilizan a la hora de la refrigeración de la maquinaria y en la extracción del crudo; los recortes de perforación los cuales se generan por una mezcla entre el suelo extraído y los hidrocarburos son materiales de tipo peligroso por lo que se deben disponer de una forma diferente.

En general, los residuos de perforación que no son peligrosos se denominan hoy en día “residuos no peligrosos” de yacimientos petrolíferos. No obstante, algunos productos químicos utilizados en los fluidos de perforación pueden ser peligrosos, como los son la soda cáustica, el diésel, los bactericidas, algunos materiales catiónicos, aceites y alcoholes. (PEÑA, 2018)

La presente tesis describe el proceso que se debe llevar a cabo para realizar la caracterización de un material producto de la extracción de petróleo, describiendo las normas de ensayo de materiales 2013 haciendo referencia a los ensayos dispuestos a las propiedades físicas y mecánicas de los suelos. Se describen y analizan los métodos de tratamiento que se utilizan a nivel internacional para el manejo de los lodos procedentes de la perforación petrolera, además de evaluar la aplicabilidad de estas técnicas a nivel nacional.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la industria petrolera es una de las más importantes en términos de economía, lo que hace que la producción y extracción de estos materiales aumente con el pasar de los años a medida que crece la demanda; la falta de investigación de otros tipos de energía hace que esta industria siga creciendo sin evaluar los graves daños ambientales que se presentan durante estos procesos. Las compañías de perforaciones petroleras durante la extracción son productoras de altas cantidades de materiales clasificados como residuos peligrosos; entre ellos los lodos de perforación, estos residuos no pueden ser utilizados en la mayoría de los casos debido a las propiedades y a la contaminación que adquieren durante el proceso de extracción, por lo cual es necesario buscar la forma de recuperar o tratar estos materiales peligrosos con el fin de disminuir la huella de contaminación de esta industria.

En este documento se realiza un estudio de la bibliografía acerca de los recortes de perforación, sus posibles tratamientos y futuros usos, con el fin de reducir al máximo los daños ambientales que se pueden producir y reutilizar la mayor cantidad de este material en otras obras civiles.

Los recortes de perforación; en cada proyecto, presentan diferentes características, propiedades y composición; por lo que se debe realizar una caracterización para determinar las mejores alternativas de tratamiento; los ensayos para suelos descritos por el instituto nacional de vías, para la caracterización de los suelos, es una de las mejores alternativas debido a que presenta algunas características básicas que ayudan a escoger la mejor opción para el tratamiento y así evaluar su futuro uso.

Para el tratamiento de los recortes de perforación existen varias alternativas aplicadas actualmente; a nivel nacional se han realizado varios estudios en diferentes trabajos de investigación acerca de los posibles usos que se le pueden dar a estos materiales ya tratados, entre los principales esta la mampostería, estructuras de relleno, bases para vías y estructuras de contención. En otros países la investigación se ha centrado en los tratamientos que se le pueden realizar a estos residuos peligrosos, buscando el funcionamiento óptimo de estas tecnologías aumentando su efectividad en la erradicación de los contaminantes.

La disposición final de los residuos ya tratados debe cumplir con la normativa ambiental vigente, además de buscar una forma en la que estos recortes puedan ser reciclados eliminando las practicas actuales para así obtener beneficios ambientales, sociales y económicos.

Sin importar el uso final que se le vaya a dar a los recortes, estos siempre deben estar sujetos a procesos o tratamientos que disminuyan o eliminen los contaminantes presentes entre los que se pueden encontrar, tratamiento físico, tratamientos químicos, tratamientos biológicos, de calentamiento o de incineración siendo estos los más costosos y a la vez los más eficientes para eliminar los materiales que no son deseados. Las empresas petroleras están siempre en la búsqueda de alguna alternativa que permita reciclar estos recortes con el fin de encontrar

beneficios tanto económicos como sociales transformando un residuo de la industria de hidrocarburos en un insumo para la industria de la construcción.

En resumen, lo que se busca en este documento es realizar una recopilación de los posibles tratamientos para los suelos contaminados con hidrocarburos producto de la extracción petrolera y además buscar un futuro uso o aplicación para estos materiales ya tratados de forma que el impacto ambiental producto de esta actividad reduzca considerablemente.

1. PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN

Debido al constante crecimiento de la industria petrolera en los últimos años y al impacto ambiental que esta actividad genera si no se cuenta con medidas de sostenibilidad ambiental, se requiere buscar diferentes alternativas que ayuden a mitigar los daños que se llegasen a presentar en dicha actividad, teniendo en cuenta que los recortes con lodos base agua y aceite, que resultan de estas perforaciones son considerados o catalogados por la legislación nacional e internacional como residuos peligrosos, esto con lleva a generar metodologías para tratar o recuperar y disponer correctamente estos recortes, evitando potenciales daños ambientales y a la comunidad.

1.2. DESCRIPCIÓN

Actualmente a nivel nacional se produce una gran cantidad de material por perforaciones petroleras, estos residuos son de manejo especial ya que son residuos catalogados como peligrosos debido a los contaminantes que este contenga.

Las empresas fijan sus objetivos pensando en el futuro, una compañía solida con una amplia trayectoria y crecimiento constante en la producción y reservas de petróleo alcanza una producción que ronda los 20.000 barriles anualmente; estas empresas busca que sus proyectos sean de carácter sostenible es decir que reúnan los componentes ambientales, sociales y económicos, con base en esto se promueven iniciativas que colaboren con la formación de nuevas generaciones en temas inspirados en la responsabilidad social con la que cuenta la compañía. Dichas compañías deben cumplir a cabalidad con la ley colombiana en todos los bloques en donde opera; contarán con Licencias Ambientales otorgadas por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y ejecutara programas permanentes de interventoría ambiental y presentar informes de cumplimiento periódicos a las autoridades pertinentes.

La extracción de hidrocarburos genera grandes cantidades de residuos contaminantes, entre estos se encuentran los lodos extraídos del suelo los cuales en la mayoría de las oportunidades se presentan con una mezcla entre el suelo a extraer y el hidrocarburo; este material es de tratamiento especial por lo cual su manejo debe ser diferente. Estos cortes de formaciones deben ser extraídos a la superficie, esto se hace mediante brocas y posteriormente son puestos en cribas de lodo, trampas de arena o desarenadores.

Las empresas pueden producir una gran cantidad de material contaminado gracias al producto de su operación, estos residuos pueden ser clasificados de acuerdo con su composición (orgánicos, reciclables, inservibles, especiales), en promedio las empresas pueden producir alrededor de 600.000Kg de residuos contaminados.

Buscando minimizar los efectos negativos en el ambiente de estos contaminantes la empresa realiza un proceso de separación en la fuente disponiéndolo según el tipo de material.

Teniendo en cuenta la cantidad de estos residuos especiales y que estos son puestos a disposición de empresas externas, autorizadas para su tratamiento, se busca la metodología para el tratamiento de estos cortes de perforación con el fin de otorgarle a la comunidad, al ambiente y a la empresa un valor agregado debido al aprovechamiento de estos materiales ya tratados, reutilizándolos en obras civiles

1.3. PLANTEAMIENTO

El proceso de extracción de hidrocarburo al no realizarse de manera adecuada puede generar altos índices de contaminación a nivel mundial, ha generado que diferentes sectores busquen formas de minimizar o mitigar los peligros que se puedan presentar por estos tipos de contaminantes.

La extracción de hidrocarburos al ser un proceso el cual genera grandes cantidades de recortes de perforación que salen impregnados de materiales y sustancias contaminantes de alto riesgo implica que sean catalogados como residuos peligrosos.

Los recortes de perforación son clasificados generalmente en dos clases base agua y base aceite, siendo este último más nocivo tanto para la salud humana como para el medio ambiente, debido a esto se busca disponer estos residuos en un lugar adecuado y cumpliendo con las exigencias nacionales para su disposición final.

Teniendo en cuenta los riesgos biológicos que tienen estos recortes existen varios métodos de tratamiento que buscan tanto mitigar los riesgos como recuperar este material para darle un provecho en pro de la sociedad, todo esto evitando al máximo la afectación del ambiente por estos residuos.

El manejo integral de los recortes se centra en los tratamientos que buscan mejorar las propiedades fisicoquímicas del material, dichos tratamientos están clasificados en cuatro grandes grupos, tratamientos térmicos, tratamientos físicos, tratamientos químicos y tratamiento biológicos, teniendo en cuenta la viabilidad de cada tratamiento en cuanto a su efectividad en remoción de los contaminantes, economía e impacto ambiental.

La recuperación y aplicación de estos recortes una vez tratados es posible haciendo una caracterización de este material siguiendo las especificaciones de normas y ensayos para suelos descritas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Lo que en definitiva busca determinar posibles usos de estos recortes recuperados como algún tipo de agregado o cualquier otro tipo de aplicación en temas de obras civiles.

2. DELIMITACION

2.1. CONCEPTUAL

Este estudio de prefactibilidad se basa en una investigación bibliográfica y en el análisis de métodos y ensayos de laboratorio con el fin de evaluar su posible tratamiento y sus diferentes aplicaciones para un recorte de material producto de la perforación de un pozo petrolero. El análisis estará centrado para el tratamiento y la posibilidad de reutilizar los materiales extraídos de la actividad petrolera, mitigando su impacto al medioambiente.

3. OBJETIVO

3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un informe descriptivo para determinar la caracterización de los recortes de perforación y sus posibles aplicaciones o usos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una descripción general de los ensayos correspondientes a la caracterización de un suelo.
 - Ensayo Descripción e identificación de suelos procedimiento visual y manual.
 - Ensayo Humedad Natural
 - Ensayo Análisis granulométrico
 - Ensayo Límites de consistencia
 - Ensayo Permeabilidad
 - Ensayo Consolidación unidimensional
 - Ensayo Corte directo
- Analizar el posible método de tratamiento para los recortes de perforación.
- Identificar el pretratamiento correspondiente para realizar su tratamiento dependiendo el método eficaz.
- Evaluar la viabilidad del uso de los recortes de perforación y sus posibles aplicaciones.

4. ANTECEDENTES

4.1. INTERNOS

En la industria petrolera una de sus principales actividades es la perforación de pozos petroleros, para dicha actividad es indispensable el uso de lubricantes para las herramientas de perforación, este proceso genera grandes cantidades de lodos de perforación en muy poco tiempo produciendo altos niveles de contaminación en estos materiales, los cuales son catalogados como *residuos peligrosos*; implicando que su tratamiento y disposición se deban realizar correctamente lo que genera un problema de manejo económico y ambiental para dichas compañías.

Los recortes de perforación son fragmentos de rocas obtenidos del proceso de perforación, constituidos por minerales de las formaciones perforadas, principalmente cuarzo, arcilla, feldspatos, carbonatos y demás compuestos de sílice que están impregnados con fluidos de perforación.

Para el tratamiento de los recortes de perforación de pozos petroleros se cuenta con una gran variedad de métodos; el funcionamiento óptimo de estas metodologías varía según los componentes fisicoquímicos y el tratamiento que se le quiera dar al material.

Teniendo en cuenta el trabajo de grado “METODOLOGÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN BASE AGUA Y SU POSIBLE USO INDUSTRIAL EN COLOMBIA. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y FACTIBILIDAD ECONÓMICA.” se estudiaron diferentes procesos para el uso de los recortes de perforación a nivel mundial, resolviendo lo siguiente:” El posible uso de ripios de perforación para la creación de bases viales se considera viable siempre y cuando el contenido de cemento sea inferior al 10% y el tiempo de secado sea de 14 días. Esto hace que el material producto tenga una resistencia a la compresión de 41.23 Kg/cm², generando resultados positivos en un suelo mejorado o modificado con cemento, suelo-cemento plástico y base granular tratada con cemento. De esta manera, un material con las características de diseño mencionadas cumplirá con las normas de construcción colombianas.” (ANGIE SUGGEY GÓMEZ VILLARREAL, 2018)

Según el documento “Estudio de viabilidad del uso de los recortes de perforación en la creación de mampostería estructural” se evaluó la viabilidad de usar los recortes de perforación en la elaboración de mampostería estructural, dando como resultados que “Mediante las pruebas de resistencia a la compresión se pudo concluir que emplear como materia prima los recortes de perforación suelo de matriz limo-arcillosa de baja plasticidad, suelo de matriz limo-arcillosa de alta plasticidad, no permite desarrollar unidades de mampostería estructural, por los bajos resultados obtenidos al realizar este ensayo en cada una de las probetas; sin embargo, si es posible desarrollar unidades de mampostería no estructural, permitiendo sobrepasar los límites impuestos por las normas técnicas

colombianas.” (Beltran, Estudio de viabilidad del uso de recortes de perforación en la creación de mampostería estructural, 2019)

Además “Logró identificarse que el diseño de mezcla en las probetas debe tener en su formulación el polímero y cemento Portland tipo I, debido a que se obtiene un aumento en la resistencia a la compresión de 5.9 MPa en cada uno de los ensayos donde fue empleado “ (Beltran, Estudio de viabilidad del uso de recortes de perforación en la creación de mampostería estructural, 2019)

4.2. EXTERNOS

A nivel internacional existen algunas referencias que ayudan a determinar y evaluar los posibles tratamientos que se puedan realizar, la matriz de evaluación de tecnologías elaborado por la EPA brinda un análisis sobre los métodos aplicables a estos Cutting oleosos o suelos empetrolados.

En el documento “Recortes de perforación de la industria petrolera generados en el Oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento”, se realizó un estudio frente a los recortes de perforación generados por la industria petrolera en el cual se analizaron las alternativas de tratamiento para estos materiales, concluyendo: “Los recortes de perforación originados de lodos base gasoil se tratarán en primer lugar mediante separación física. Se propone tratar a los residuos en fase lodo del separador físico mediante desorción térmica junto a suelos con alto nivel de hidrocarburos totales del petróleo. Los recortes base agua se tratarán con la técnica de biopilas aireadas mecánicamente junto a los suelos empetrolados que se generan en el yacimiento en estudio (HTP (hidrocarburos totales del petróleo) <8%) y las corrientes sólidas del separador físico y del desorbedor térmico.” (Sergio A. Vardaro, 2018).

En la tesis “EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA RECORTES DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS CON LODO BASE HIDROCARBURO EN ARGENTINA” se evaluaron y compararon los métodos de tratamiento de materiales contaminados con hidrocarburos teniendo como base las normativas argentinas, arrojando las siguientes conclusiones acerca de estos métodos:

- Incineración: es demasiado costosa / genera altas emisiones gaseosas / se utiliza para otros contaminantes.
- Desorción térmica: es más costosa y menos segura que la desorción termo-mecánica.
- Landfarming es económico, pero requiere instalaciones fijas / tratador autorizado / controles permanentes / agua de riego en clima seco / gran área de cobertura con geo membrana inferior y superior / altos tiempos de tratamiento.
- Biopilas: es económico / se mantiene bien la temperatura en la pila / mejor control de variables clave que landfarming.
- Oxidación química: alto consumo de agua y de oxidantes / uso de sustancias peligrosas / dificultad de aprobación por el Ministerio de Ambiente.

- Extracción con solventes: alto costo / mayor tiempo de tratamiento que desorción / uso de solventes dificulta aprobación del Ministerio.
- Extracción con fluidos supercríticos: demasiado costosa.
- Lavado: costos moderados / adaptables a variaciones en la concentración de HC de entrada / mejor tecnología para suelos arcillosos / agua de lavado y de retorno a PTA.
- Fitocorrección: Pulido final.” (Ismirlian, 2018).

5. JUSTIFICACION

Este informe se realizó con el fin de describir y analizar diferentes métodos para el tratamiento y la disposición final de los recortes de perforación para evaluar el posible uso de estos materiales en procesos de construcciones.

La industria petrolera ha tenido un crecimiento favorable en los últimos tiempos lo que ha provocado un mayor aumento en recortes con lodos base hidrocarburo o base agua que resultan de la perforación de algunos tipos de pozos petroleros, catalogados por la legislación nacional o provincial como residuos peligrosos, implica que, de no ser tratados y dispuestos correctamente, simplemente se acumularían, con el potencial de causar daños ambientales y a la comunidad por posible formación de lixiviados hacia los acuíferos y escorrentía hacia aguas superficiales, así como la volatilización de los hidrocarburos al ambiente (Ismirlian, 2018).

Actualmente las técnicas que se emplean para el tratamiento y disposición de estos residuos especiales no son tan conocidas y empresas externas son principalmente las encargadas de disponer estos materiales para así minimizar cualquier impacto negativo en el ambiente.

Para los recortes de perforación es de gran importancia encontrar una forma en la que se puedan reciclar adecuadamente, de tal manera que se puedan eliminar sus prácticas actuales generando beneficios ambientales, sociales y económicos reutilizando los desechos de la industria de los hidrocarburos en proyectos de obras civiles.

6. ESTADO DEL ARTE

La alta demanda energética en el mundo moderno ha determinado el uso intensivo del petróleo y sus derivados como su principal fuente. Muchos de sus componentes son empleados como materias primas básicas en las industrias químicas y petroquímicas. Este aumento en la explotación del petróleo ha determinado la aparición de crecientes fuentes de contaminación. Por ejemplo, derrames accidentales desde buques petroleros, extracción, y procesamiento del petróleo y sus derivados, etc. De ahí la trascendencia de encontrar

herramientas que permitan aumentar la velocidad de biodegradación de este tipo de compuestos (Benavidez et al. 2006, Aranda, 2003).

Hoy en día existen diversos métodos para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos tanto en Colombia como en el resto del mundo; los tratamientos para los suelos contaminados con hidrocarburos están regidos a nivel internacional por una matriz creada por la EPA (Environmental Protection Agency, agencia de protección del medio ambiente) llamada “la matriz de evaluación de tecnologías”.

En la naturaleza, los hidrocarburos son eliminados del suelo por procesos de biodegradación, volatilización, percolación y drenaje superficial, por esto en los últimos años se ha prestado mucha atención a los métodos biológicos tanto para el tratamiento de residuos industriales como en la recuperación de sitios contaminados. Estos métodos se conocen genéricamente como procesos de biorremediación y tienen como objetivo el aprovechamiento y optimización de las capacidades biodegradadoras naturales (Vecchioli, 1998, Vecchioli et al., 1997; Brown et al., 1983).

En Colombia actualmente el más usado es el proceso de biorremediación como principal método de tratamiento para los suelos contaminados con hidrocarburos, El principio básico de la biorremediación consiste en aumentar la velocidad de degradación natural de los hidrocarburos contaminantes de los suelos, puede ser mediante la mezcla del residuo con la capa superficial del suelo (material orgánica en forma de humus) y abonos orgánicos naturales, los cuales contienen microorganismos facultativos que se adaptan al consumo y degradación de los hidrocarburos. En el proceso también se dan reacciones fisicoquímicas, por exposición a agentes naturales, como la radiación solar, la humedad y viento de cada zona (Fonseca y Vargas, 2006; Lugo y Mesa, 2001; Chirinos y Pereira, 1999).

Para los recortes de perforación se deben tener unos correctos cuidados además que su tratamiento puede realizarse de diversas formas para su posterior reutilización o restauración; estos métodos tienen como objetivo principal mejorar las condiciones de estos suelos para poder disponerlos finalmente en sitios adecuados de manera que sea ambientalmente viable y que pueda generar algún tipo de cambio de tipo sostenible que conlleve a mejorar las condiciones de las locaciones cercanas al proyecto de donde se extraiga el material.

Existen varias tipologías para la restauración y futura reutilización de estos suelos, entre estos tratamientos se encuentran los de tipo biológicos que, generalmente, son técnicas que se basan en la degradación del material contaminante mediante el uso de microorganismos en ambientes controlados que pueden ser aireados o sin airear; este material junto con los microorganismos se junta en biopilas o mediante el proceso de landfarming. El proceso de biopilas consiste en formar pilas con el residuo y estimular la actividad microbiana, aireando y adicionando nutrientes y humedad. Regularmente se cubren con plástico para evitar la evaporación de los contaminantes y favorecer el calentamiento de la pila. (Ismirlian, 2018).

El landfarming consiste en un vertido controlado de recorte de perforación sobre una superficie de terreno dispuesta para actividades del sector agrícola. (Beltrán, 2019). Los

tratamientos térmicos usan fuentes de calor para eliminar los contaminantes de los suelos, entre los métodos más usados se encuentra la desorción térmica la cual permite erradicar por completo cualquier tipo de contaminante además de que reduce de tamaño el material lo cual aporta un beneficio en cuanto al impacto ambiental. Los cortes pasan por un tornillo sin fin donde son triturados en partículas pequeñas, luego, se calientan en un horno sin estar en contacto con el fuego directamente, el corte sale en cenizas y listo para ser dispuesto en llenar terrenos, estabilizar suelos, formar materiales de construcción o cualquier otro uso que pueda hacerse ya con un material molido (Beltrán, 2019).

El principal beneficio de este tratamiento es la reducción de hasta el 50% de volumen del recorte de perforación. En términos de tratamientos fisicoquímicos existen varios métodos que ofrecen una solución viable a estas problemáticas, los métodos son de lavado, de oxidación química, de extracción y de estabilización/solidificación. El proceso de lavado consiste en poner en contacto el material con una solución de tensoactivos y agua, estos elevan la temperatura del material y hacen que el contaminante pase a otra superficie para su extracción. La oxidación química es un proceso donde se emplean sustancias químicas que destruyen los componentes contaminantes presentes en el suelo convirtiéndolos en dióxido de carbono y agua.

El principio de extracción se basa en la solubilidad preferente de los componentes orgánicos en el solvente versus en la matriz sólida con agua (Ismirlian, 2018). El tipo de solvente depende de las características que se presenten en el material extraído.

7. MARCO REFERENCIAL

7.1. MARCO TEÓRICO

7.1.1. Diseño de Perforación

El diseño de la perforación de los pozos de perforación tiene como principal objetivo construir un conducto desde el yacimiento donde se encuentra el petróleo crudo hasta la superficie de este, teniendo en cuenta realizar la explotación de hidrocarburos de manera segura y económica.

Es sumamente importante realizar el diseño del pozo lo más eficaz posible dado que la inversión total del mismo se reparte un 30% en técnicas geológicas y geofísicas y el 70% restante corresponde a la perforación siendo vital el cumplimiento de este objetivo.

El diseño de pozo es un proceso ordenado y sistemático, con lo cual es importante tener en cuenta todos los aspectos generales, que son: Recopilación de la información disponible, predicción de presiones de formación y fractura, determinación de la profundidad de asentamiento de las tuberías, selección de la geometría y trayectoria del pozo, programa de

fluidos de perforación, programa de brocas (barrenas), diseño de programa de revestimiento y programa de cementación, programa hidráulico, selección de equipos de perforación tiempos estimados de perforación y costo de perforación. (Quirama, 2012)

7.1.2. Etapas de la perforación

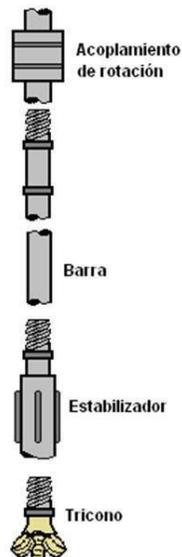
Estas etapas se mantienen igual para cualquier tipo de perforación, solo varían las características que se presenten en cada ítem, las etapas que se tienen como base para en el diseño de los procesos de perforación son: perforación, introducción de la tubería de revestimiento y cementación.

7.1.3. Equipos de Perforación

- **Sarta de perforación**

Una sarta de perforación tiene como finalidad transmitir rotación y torque desde el top drive y a su vez transporta el fluido de perforación a la barrena. La sarta de perforación se somete a diversos esfuerzos de tensión, compresión, presión interna, fatiga, torsión y abrasión, los cuales deberán ser soportados por la estructura por lo que su diseño debe ser superior a estos esfuerzos.

Ilustración 1: Sarta de Perforación



Fuente: <https://www.researchgate.net/figure/Sarta-de-perforacion-de-las-perforadoras-Las-barrenas-cuya-lonitud-va-a-depender-de-la-fiq9-321533502>

Sistema de movimiento en la sarta de perforación

La principal función que tiene este sistema es brindar la posibilidad de levantar, bajar o suspender el equipo usado en el sistema rotativo.

- **Estructura de soporte:** esta estructura está compuesta por una subestructura la cual está ubicada en la parte inferior del mástil con el fin de soportar el peso de la tubería y los demás accesorios, además de brindar la altura requerida para la instalación de los cabezales, soportar el piso de perforación y facilitar espacio para el equipo.

El piso de perforación es el lugar indicado para realizar maniobras durante la perforación del pozo; también se tiene un mástil de perforación el cual cuenta con la capacidad de soportar toda la carga vertical del pozo su principal objetivo es ser el armazón que sostiene todo el sistema de perforación.

- **Equipo para el levantamiento de carga:** Se compone por un malacate que es el equipo encargado de subir o bajar la sarta y un cable de perforación fabricado con alambres de acero cuenta con un alma o núcleo, torones y alambres.

- **Broca de Perforación**

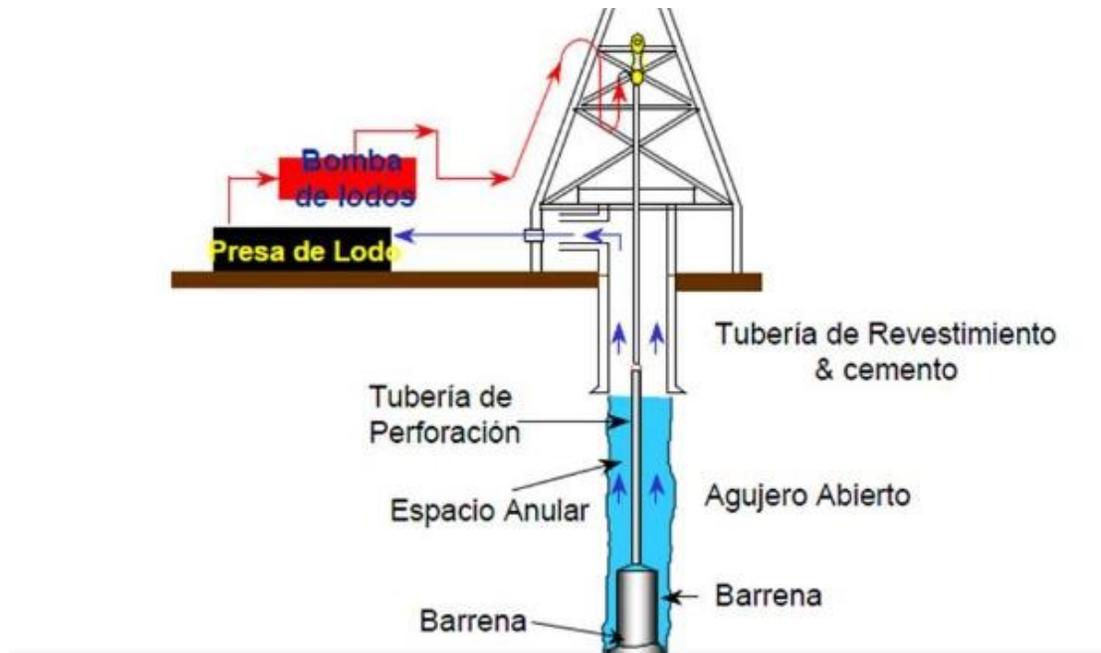
Es un dispositivo que va conectado al extremo de la sarta de perforación que tiene el fin de cortar, romper o triturar las formaciones rocosas en el momento de la perforación de un pozo, existen muchos tipos de brocas por lo cual es de suma importancia la selección de esta teniendo en cuenta las especificaciones del terreno.

- **Sistema de Circulación de Fluidos**

Tiene como función principal extraer los recortes de roca del pozo mientras tanto se realiza el proceso de perforación.

El lodo de perforación es bombeado desde la bomba de succión, a través de un tubo vertical de acero (standpipe), hasta una manguera de Kelly, esta se encuentra conectada a la mesa rotaria, entra al pozo a una presión y caudal establecido por el previo diseño del programa de perforación, sale de la broca entrando al anular, luego, el lodo sucio (con recortes de perforación) entra al Flow line hasta llegar a la Zaranda, la cual es una tela metálica vibratoria que separa los ripios del lodo, la parte líquida extraída pasa a la piscina, donde la bomba dispone del fluido de perforación para comenzar el ciclo (viaje al interior de la tubería de perforación), en la piscina de perforación es en donde se le añade el nuevo líquido y demás elementos químicos requeridos. (Quirama, 2012)

Ilustración 2: Sistema de Circulación de Fluidos.



Fuente: <https://es.slideshare.net/Juanchoperezr/lodos-deperforacion>.

- **Fluidos de Perforación**

Este es uno de los componentes de mayor importancia en el proceso de perforación dependiendo de las propiedades de este el éxito de la realización del pozo, este se define como cualquier fluido ya sea líquido, gas o mezcla de fluido con sólidos, que fueran utilizados en operaciones de perforación para controlar el pozo.

Según sus propiedades tienen diferentes funcionalidades por lo cual se pueden encontrar diferentes tipos de fluidos en la industria petrolera, en operaciones offshore, al ser operaciones de alta probabilidad de riesgo, es común usar fluidos base aceite. Mientras los fluidos base agua son comúnmente usados en operaciones onshore por su menor valor de diseño. (Martinez, 2019)

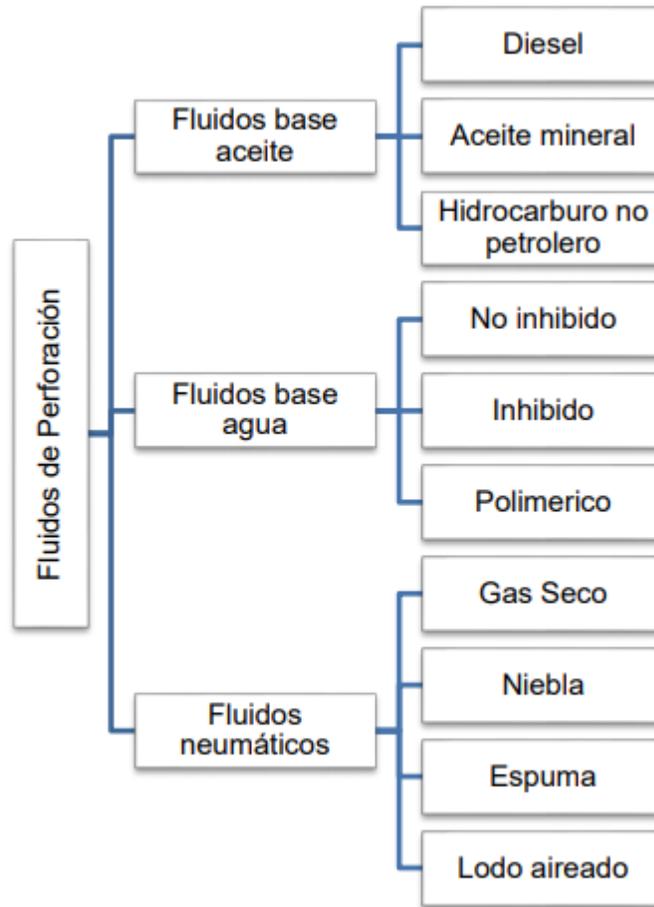
7.1.4. Clasificación de Fluidos de Perforación

Fluidos Base Agua: son los más comunes son aquellos en donde su fase líquida depende del agua disponible en la ubicación de la perforación ya sea agua dulce, salada o salmuera concentrada, su composición se da a partir de sales disueltas, compuestos orgánicos y la suspensión de partículas minerales.

Fluidos Base Aceite: son aquellos en la que su fase continua es aceite, están compuestos por alrededor de 5% de agua, son usados para mejorar la lubricación y reducir la fricción en condiciones especiales como son las altas temperaturas, perforaciones con pozos de gran alcance, este fluido tiene como base Diésel, aceite mineral y agua como fase dispersa.

Fluidos Base Sintética: son los cuales su base consta de un aceite sintético, es usado principalmente en las plataformas offshore, teniendo las mismas propiedades de los lodos base aceite, pero con toxicidades mucho menores. (VALBUENA, 2016)

Tabla 1: Fluidos de Perforación



Fuente:
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/633/1/5131638-2016-2-GA.pdf>

7.1.5. Funciones del Fluido de Perforación

Los fluidos de perforación cumplen con distintas funciones según su composición y el uso que se le quiera dar a este, entre las principales funciones que tienen estos fluidos está el control de las presiones de formación, la remoción de los cortes del pozo, el enfriamiento y la lubricación de los equipos en especial de la broca, el control de corrosión, transmitir

energía hidráulica al fondo del pozo mediante la broca, aumentar la viscosidad. (Martinez, 2019)

Tabla 2: Funciones de los Fluidos de Perforación.

| Categoría | Función | Tipo químicos |
|---|--|---|
| Peso | Aumenta la densidad (peso) del lodo, equilibrando la presión de la formación, evitando un reventón. | Barita, hematita, calcita, limonita. |
| Viscosidad | Aumenta la viscosidad del barro para suspender los recortes y el agente de peso en el barro | Bentonita o arcilla atapulgita, carboximetil celulosa y otros polímeros |
| Disolventes y agentes de estabilidad de la temperatura | Arcillas defloculadas para optimizar la viscosidad y la resistencia del gel del barro | Taninos, polifosfatos, lignito, lignosulfonatos |
| Reductores de filtrado | Disminuya la pérdida de fluido a la formación a través de la torta de filtro en la pared del pozo | Bentonita, lignito, Na-carboximetilcelulosa, poliacrilato, almidón pregelatinizado |
| Materiales de circulación perdidos | Tapa las fugas en la pared del pozo, evitando la pérdida de todo el lodo de perforación a la formación | Cáscaras de nuez, materiales fibrosos naturales, sólidos inorgánicos y otros sólidos insolubles inertes |
| Lubricantes | Reduce el torque y arrastre en la sarta de perforación | Aceites, líquidos sintéticos, grafito, surfactantes, glicoles, glicerina |
| Materiales de control de shales | Controla la hidratación de la pizarra que causa la hinchazón y la dispersión de la pizarra, colapsando la pared del pozo | Sales solubles de calcio y potasio, otras sales inorgánicas y sustancias orgánicas como glicoles |
| Emulsionantes y surfactantes | Facilitar la formación de una dispersión estable de líquidos insolubles en la fase acuosa del lodo | Detergentes aniónicos, catiónicos o no iónicos, jabones, ácidos orgánicos y detergentes a base de agua |
| Bactericidas | Prevenir la biodegradación de los aditivos orgánicos Evitar que la tubería se pegue al pozo | Glutaraldehído y otros aldehídos |

Fuente: <http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/7454/1/461852-2019-I-GA.pdf>

7.1.6. Recortes de Perforación

Los recortes de perforación son partículas generadas a partir de trituración de la broca durante el proceso de perforación, estos caen al fondo y son llevados a la superficie gracias al lodo de perforación que son mezclas preparadas con una gran cantidad de aditivos químicos.

Cabe resaltar que durante la etapa de perforación son generados grandes cantidades de residuos o recortes de perforación, si se tiene un pozo típico de 16,000 pies

(aproximadamente 5 kilómetros) de profundidad pueden ser generados 4000 barriles de recortes de perforación. (Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013).

Los recortes de perforación se componen principalmente de arenas, arcillas, minerales y aditivos, el volumen de recortes generados depende de la profundidad y el diámetro de la perforación, siendo de mayor volumen las etapas iniciales puesto que el diámetro de ésta es mayor, la descarga de estos sólidos puede ser continuando habiendo periodos de menos de 1 hora y hasta de 24 horas por día, El mayor inconveniente en este caso no se produce por el volumen de sólidos que se generan, sino por la toxicidad de estos, ya que estuvieron en continuo contacto con el fluido de perforación, por lo que es muy común tener recortes con impregnaciones de aceites o cualquier otro contaminante. (Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013).

- **Composición de los cortes de perforación**

La composición de los recortes de perforación principalmente depende del tipo de formación geológica en la que se encuentre cada sección de la perforación, además del tipo de lodo que se use bien sea en base agua, aceite o sintéticos. Los recortes de perforación se componen principalmente de barita, bicarbonato de calcio, bentonita, sales orgánicas, polímeros orgánicos, inhibidores de corrosión, detergentes y biocidas. (ORESHKIN & CHEBOTAEV, 2015).

Los recortes generalmente de perforación se componen de una serie de partículas producto del desprendimiento del interior de las rocas molidas por la acción giratoria de las brocas, frecuentemente están constituidas por rocas sedimentarias y algunos minerales naturales. otro factor para determinar la composición de estos recortes es el contenido del fluido de perforación, debido a que este fluido varía según cada proyecto y cada pozo, este contenido también varía según la profundidad y el diámetro que se esté utilizando. (ESPINOSA, 2013).

Dentro de la composición de los cortes de perforación se encuentran metales pesados presentes en los cortes de perforación se encuentran el Cadmio, el cual es tóxico como el zinc afectando principalmente la salud humana; el Plomo, afecta a la mayoría de los organismos vivos sobre el sistema nervioso; el Mercurio, es neurotóxico y peligroso, se bio acumula en la cadena alimenticia; el Arsénico, es muy tóxico, cancerígeno, incluso puede causar la muerte; Cobre, en dosis altas puede provocar irritación en el estómago e intestino, anemia, daño renal y hepático Cromo. Según Schinitman, adiciona que estos lodos también pueden presentar metales como Cobalto, Hierro, Selenio, Manganeso, Molibdeno, Antimonio, Bario, Plata, Talio, Titanio, Estaño, Zinc, Cromo, Vanadio. (SCHINITMAN, 2018).

- **Equipos para Retirar los Recortes de Perforación**

Para tener un control de estos sólidos se tiene 3 equipos principales los cuales son:

- **Zaranda:** Es el primer equipo para el control de sólidos, tiene un funcionamiento en el cual solo se permite separar por diferencia de tamaño, en el cual el tamaño más pequeño es de 74 micrones. Entre los factores que pueden afectar su eficiencia está la densidad del lodo, velocidad de perforación, velocidad de circulación y movimiento de la malla de perforación. (BAUTISTA PUENTE, 2010).

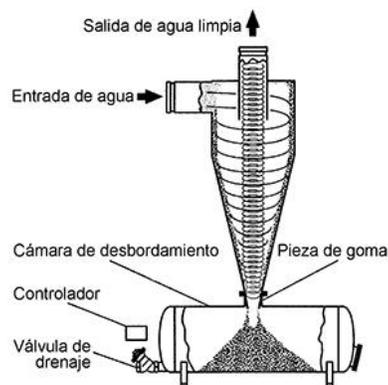
Ilustración 3: Zaranda



Fuente: <https://www.dismet.com/productos/zarandas-dismet/>

- **Hidrociclones:** La principal función de este elemento es la separación de los materiales mediante la diferencia de densidad dando, así como resultado la separación de sólidos más pequeños que con la zaranda, la separación de estas partículas varía según el tamaño del como con el que cuente el equipo.

Ilustración 4: Hidrociclones.



Fuente: <https://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/hidrociclone>

- **Centrifuga:** Esta máquina tiene como principio el uso de asentamiento mediante giros rápidos para aumentar la fuerza G sobre el fluido, de esta manera se aumenta la velocidad de asentamiento considerablemente.

- **Manejo Integral de los Recortes de Perforación**

A nivel mundial cada día es más controlada la producción, tratamiento y descarga de recortes de perforación es más controlada, principalmente en los ecosistemas marinos se tiene un control especial debido al alto daño que producen estos fluidos, por lo que estos lodos deben ser cibles budis y transportados a un lugar seguro para su futuro tratamiento y posterior disposición o reutilización.

En Colombia, la técnica más utilizada para el manejo y tratamiento de estos recortes de perforación es la extracción del material y transportarlo a un tratamiento in situ. El gran problema en este método es que los lodos extraídos deben ser almacenados correctamente para su transporte ya que de no ser así podría inferir un gran daño para los ecosistemas cercanos y en este caso la perforación se suspenderá. (Arévalo Peña, 2018).

- **Almacenamiento**

El material que es retirado del sistema de la zaranda es introducido en un barril de 40 pies de alto, llamado tanque de zaranda, este tipo de almacenamiento es temporal entre tanto se disponga de un sitio adecuado para su tratamiento o disposición final, en algunos casos se agrega un agente deshidratador como la cal viva. (ANGIE SUGGEY GÓMEZ VILLARREAL, 2018).

Otra alternativa de almacenamiento es la presa de desperdicios. en la cual se deben seguir minuciosamente los procedimientos de compactación requeridos para evitar infiltraciones al subsuelo, algunas cuentan con geo membranas que recubren las paredes para evitar el mismo problema, las presas miden aproximadamente 20 x 20 x 1m, en estas presas se acumulan los lodos de perforación con fluidos base agua y una vez terminada la operación son transportadas a otras presas.

- **Transporte**

El transporte de los recortes de perforación vía terrestre se debe realizar con extremo cuidado para no generar la proliferación de contaminantes contenidos en estos materiales, los responsables del traslado de los recortes deben realizar un detallado control sobre el manejo que se le dará a los recortes.

Los contratistas encargados de efectuar el transporte de estos materiales deben cumplir con los requisitos establecidos por la normatividad colombiana vigente en materia ambiental, además de contar con un plan de contingencia en caso de presentarse algún inconveniente.

- **Reutilización y Reciclaje**

Los recortes como ya fue mencionado anteriormente de perforación se producen por el rompimiento de la roca durante el proceso de perforación donde el volumen de estos recortes depende del diámetro y la profundidad de la perforación, sin embargo, hay que tener en cuenta que estos sólidos extraídos pueden tener restos de fluido adheridos a ellos y la presencia de algún contaminante o la composición depende del fluido que fue usado.

Existen diferentes alternativas para reutilizar este material siendo la más representativa para el revestimiento en carreteras ya que este material posee características de densidad de mezcla que son aprobadas el asfalto en carreteras o mezclas.

A pesar de que el reciclaje ayuda a conservar recursos y reducir desechos, este proceso implica gastos económicos y ambientales debido a la recolección y el reciclado de estos materiales por lo cual es importante considerar este recurso para el caso de desechos que no puedan ser reutilizados, estos residuos pueden ser en un momento dado la materia prima a utilizar en otras actividades.

7.1.7. Métodos de Tratamiento de los Recortes de Perforación

Estos métodos están pensados para mejorar las condiciones de los recortes de perforación, estos procesos nos arrojan resultados diferentes y gracias a esto se puede determinar su disposición final de manera que sea viable tanto ambiental como económicamente.

El área ambiental generalmente debe tener información detallada de las ventajas y desventajas de cada tratamiento que sea viable realizar ya que de acuerdo con esto determinan los riesgos y los costos y el método de eliminar el residuo.

Es vital conocer la naturaleza de cada uno de los métodos a los que los recortes pueden someterse y a continuación se describen las prácticas más reconocidas y con mejores resultados.

7.1.8. Pretratamiento

El pretratamiento es toda aquella actividad que tiene como fin la preparación de los lodos de perforación para su tratamiento, generalmente lo que se busca es la separación de las partículas que componen estos lodos mediante el uso de diferentes instrumentos; las zarandas son las encargadas de realizar la remoción de los sólidos gruesos, los desarenadores son los encargados de separar las partículas arcillosas y arenosas del fluido de perforación por último para separar sólidos más pequeños se utilizan las centrífugas.

Lo que se busca principalmente al realizar el pretratamiento es reducir la humedad de los lodos, hasta no menos del 10% de humedad, con el fin de trabajar en un “estado seco” ya que

esto fortalece las alternativas de tratamiento, además de brindar la posibilidad de la reutilización del fluido de perforación. Si los lodos de perforación presentan una humedad menor al 10% estos deben ser rociados con agua para así poder aplicar el tratamiento seleccionado.

7.1.9. Tratamientos térmicos

En estos procesos se usa la alta temperatura para la destrucción de los agentes tóxicos, principalmente orgánicos. (Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013)

- **Desorción**

- **Desorción Térmica**

La desorción térmica es el proceso en el cual se busca elevar la temperatura de los lodos, mediante una fuente de calor directa o indirecta, hasta el punto de volatilizar el agua y los residuos orgánicos presentes en el lodo, la temperatura debe ser la necesaria para lograr el punto de ebullición de los contaminantes, además de controlar el tiempo que el material será expuesto a la fuente.

La mayor ventaja que presenta este método es que los vapores generados son condensados para así separar el agua y el hidrocarburo para ser recuperado. Además de esto el proceso presenta las siguientes ventajas:

- Los residuos reciben un tratamiento completo, eliminando futuros riesgos de contaminación.
- Grandes volúmenes de suelos contaminados son recuperados en corto tiempo.
- Debido a la reutilización del hidrocarburo se genera un ahorro considerable.
- El sistema o planta requerido puede ser operada en el punto de corte y de esta forma reducir los costos.

En pruebas piloto se ha podido analizar que este método es muy eficaz en la eliminación de los compuestos orgánicos y el mercurio presentes en el suelo, claro está que este método presenta variaciones en su eficacia según como varían los compuestos orgánicos en el material; para tratar un material que contenga compuestos orgánicos volátiles (COV), no halógenos y combustibles es necesario que durante el proceso este se realice con bajas temperaturas para así obtener los mejores resultados.

Cuando es necesario tratar compuestos orgánicos semivolátiles (SVOC), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), pesticidas y metales volátiles (como el ya mencionado, mercurio), se debe contar con una temperatura prudentemente alta.

El proceso de la desorción térmica es bastante rápido, según la maquina utilizada, existen mecanismos que ofrecen hasta 20 toneladas por hora; claro está que esto es sujeto a factores como el porcentaje de humedad del suelo, los tipos de contaminantes químicos aplicados al material, de la cantidad de los agentes químicos, la calidad y cantidad del suelo contaminado y su correspondiente descripción. (BONILLA, 2013).

- **Método Directo:** En este método el calor es transferido al residuo gracias a la radiación de una llama o por convección de los gases que provienen de la combustión del combustible, la transferencia del calor es dispuesta en la secadora rotativa y puede alcanzar temperaturas de 300°C a 400°C. Los vapores generados de hidrocarburos y de combustión salen juntos en este método, aumentando así la cantidad de gases luego de la condensación de los hidrocarburos.
- **Método Indirecto:** Se diferencia del método directo principalmente en el secador rotativo dado que este es de doble carcasa y el material a tratar se encuentra donde de la capa interna del secador, tiene como principio principal el de la conducción del calor por lo cual se requiere un líquido con alto poder calorífico (agua, aceite sintético), los cuales son calentados por una fuente de calor externa. En este método los vapores de hidrocarburos y de combustión salen por separado, reduciendo así la cantidad de gases incondensables.

Para el buen funcionamiento del método de desorción térmica es necesario cumplir estos parámetros:

- **Humedad:** El material deberá contener una humedad que esté entre 10% y 20%; estos rangos se toman ya que una humedad más alta necesitará mucha más energía para la eliminación de los compuestos orgánicos y la evaporación del agua, mientras que una baja humedad genera problemas por la generación de polvo.
- **Niveles de concentración de hidrocarburos totales del petróleo de entrada:** estos niveles varían según el tipo de contacto (directo e indirecto); para los de contacto directo se admite un rango de 2 a 4% de hidrocarburos totales, mientras que en los de contacto indirecto se admite un porcentaje de hidrocarburos del 50 a 60%.

Una desventaja de este método es que el único metal contaminante al que puede ser aplicado este método es el mercurio. (Naval Facilities Engineering Service Center, 1998).

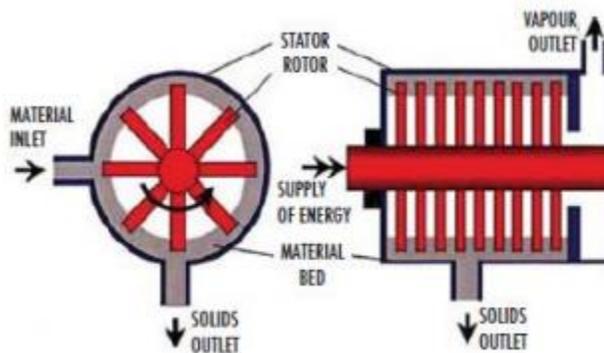
○ **Desorción Termo-mecánica**

Este método también conocido como “hammermill”, con el fin de lograr la evaporación del agua y de los compuestos orgánicos presentes en los lodos, consiste en un eje central que conecta varios martillos rotativos, los cuales giran a alta velocidad generando fricción entre los materiales.

El nivel de giro, la velocidad, la rotación e inclinación se obtienen a partir de los puntos de ebullición de los contaminantes, ya que son los que se busca eliminar; si la turbulencia no es la adecuada puede no transferirse el suficiente calor.

Al igual que en la desorción térmica la mayor ventaja que presenta este método es que los vapores generados son condensados para la reutilización de los hidrocarburos.

Ilustración 5: Desorción Termo-Mecánica.



Fuente: <https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/1127/Tesis%20Paula%20Luc%c3%ada%20Smirlian.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- **Calentamiento con Radiofrecuencia**

Este proceso usa la energía electromagnética para la eliminación de los contaminantes, mediante la volatilización de estos. su energía es similar a la usada en un microondas. este método solo se puede utilizar en cuerpos que no conduzcan electricidad.

- **Incineración**

Es el proceso por el cual se queman materiales peligrosos a fin de destruir contaminantes nocivos. La incineración también reduce la cantidad de material que se necesita eliminar en un vertedero controlado. Si bien la incineración destruye una variedad de contaminantes tales como bifenilos policlorados, solventes y plaguicidas, no destruye metales. (MONTALUISA, 2018).

En este método el residuo se somete a temperaturas altas, mediante un incinerados, que rondan entre 870°C y 1200°C con el fin de volatilizar y destruir los compuestos orgánicos, durante este proceso pueden producirse gases o vapores tóxicos con nitrógeno, azufre o compuestos que difieren según la composición del residuo.

La Cámara de combustión y la combustión controlada se dimensionan teniendo en cuenta que se debe asegurar un consumo mínimo de combustible y poder aprovechar el poder calorífico del residuo, el combustible auxiliar solo en necesario si el residuo tiene bajo poder calorífico y/o alto contenido de humedad.

Este proceso al calentar el material a tan altas temperaturas produce unos gases los cuales son llevados a por una flama para así elevar su temperatura y descomponerlos para finalmente combinarse con oxígeno para generar gases mucho menos nocivos y vapor de agua.

Los gases producidos en el incinerador pasan a través de un equipo de control de contaminación de aire donde se elimina cualquier metal, ácido y partícula de ceniza remanente. Tales desechos son nocivos y deben desecharse en forma adecuada en un vertedero autorizado. Los otros gases más limpios, como el vapor de agua y el dióxido de carbón, se liberan al aire a través de una chimenea. (MONTALUISA, 2018).

El remanente del proceso de incineración se lo puede eliminar mediante un vertedero o enterrándola en el sitio. Este método resulta más eficaz debido a que destruyen agentes contaminantes que otros métodos no logran y se requiere de un menor tiempo.

Uno de los principales objetivos de este sistema consiste en la recuperación de energía; se convierte en una de las principales ventajas de este método la alta reducción del volumen del residuo y la posibilidad de recuperar energía gracias a los gases con altos contenidos volátiles que se producen por la combustión. (INFANTE, 2017).

Su principal desventaja por otro lado, es debido a los elevados costos por la utilización de materiales resistentes a altas temperaturas también, los tiempos de puesta en marcha y parada ya que cada uno tarda alrededor de media hora, el consumo de combustible y el costo de mantenimiento dado que se requiere una parada para mantenimiento de 1 día cada 45 días.

El método es usado principalmente cuando el residuo contiene componentes pesados, es un proceso casi de destrucción total de la materia peligrosa, sin posibilidad de recuperar los hidrocarburos contenidos en el recorte.

7.1.10. Tratamientos biológicos

Mediante la acción de bacterias propias del suelo se realiza la disminución de la concentración de agentes residuales, estos métodos son aplicables a residuos tanto peligrosos como no peligrosos, básicamente consiste en la degradación de la materia orgánica convirtiéndola en dióxido de carbono, agua y energía. (Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013).

Para la selección del método de los tratamientos biológicos a utilizar, es necesario seguir una serie de pasos que ayudan a la selección más factible para la remediación del suelo contaminado, estos son:

1. Investigación y caracterización: se debe determinar el tipo de contaminante, la concentración y la cantidad de este en el material.
2. Análisis y elección de medidas biocorrectivas: se busca determinar las medidas necesarias para realizar el tratamiento, esto en base a las propiedades físicas y químicas de los contaminantes, los factores ambientales y así finalmente determinar la mejor opción.
3. Diseño y evaluación: el diseño y la evaluación están sujetas a un procedimiento de tres pasos con el fin de evaluar la viabilidad de la técnica seleccionada, la evaluación del diseño y del control y seguimiento.
4. Control y seguimiento: buscando obtener el mayor rendimiento se deberá realizar un control de las condiciones de degradación y biodegradación, además de un seguimiento a los parámetros que afectan directamente el funcionamiento del sistema.
5. Análisis e interpretación de resultados: como último paso se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos; si es necesario se deberán anexar correcciones o modificaciones al sistema con el fin de mejorar los resultados del tratamiento. (CYNDY ARGOTE SIERRA, 2011).

- **Biodegradación**

La biodegradación es el proceso en el cual se utilizan algunos organismos vivos, usualmente bacterias y otros microorganismos, con el fin de descomponer alguna sustancia orgánica, en este caso el hidrocarburo.

Existen dos formas en las que puede ocurrir la biodegradación, de manera aerobia (con oxígeno) y anaerobias (sin oxígeno); el método a escoger varía según la composición del material que se quiera tratar. Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana. (Maroto, 2000).

El método presenta 4 formas en las que se puede realizar el proceso aprovechando esta serie de microorganismos:

- Biodegradación pasiva: En este proceso no se realiza ninguna adición de nutrientes o microorganismos; se trabaja con los organismos presentes naturalmente los cuales van a degradar los compuestos biodegradables convirtiéndolos en productos inofensivos.
- Bioventilación: En este caso lo que se busca es adicionar oxígeno mediante ventilación. La entrada de aire al material ayuda a la degradación de los hidrocarburos presentes por volatilización y por biodegradación debido al aumento en la actividad bacteriana, principalmente esta tecnología se ha

utilizado con resultados satisfactorios en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, pesticidas, conservantes de madera, compuestos orgánicos y disolventes no clorados; no es recomendable en la eliminación de compuestos inorgánicos.

- Biodegradación in situ: este proceso tiene como principal ventaja la reducción de costos ya que el tratamiento se realiza in situ, es decir que no es necesario extraer el suelo contaminado y este es tratado mediante tecnologías innovadoras; la dificultad principal que tiene este proceso es el tiempo que se emplea para la biodegradación el cual, generalmente, es bastante largo.

- **Biopilas**

Este proceso se basa en formar pilas con el residuo y así estimular la actividad microbiana, aireando además de agregando nutrientes y humedad, estas pilas se recubren con plástico que evita la evaporación de los contaminantes y facilita el calentamiento de la pila.

La aireación se puede llevar a cabo de manera activa o pasiva, la primera consiste en el sistema de inyección y extracción de aire el cual se denomina bioviento, mientras que para el método pasivo se deja que el viento penetre de forma natural, por ello para mejores resultados se voltean las pilas por lo menos una vez por mes.

Durante la construcción de la pila es necesario asegurarse de que todo el residuo se hidrate de forma homogénea, esta necesidad de riego se da dependiendo de la ubicación y de la estación del año, el riego por goteo no se recomienda debido a que se crean canales preferentes lo que produce que la pila se seque.

El principio básico consiste en la biorremediación considerando que algunos compuestos livianos con menos de 6 carbonos se volatilizan fácilmente, también se ve afectado con la inyección del aire puesto que este enfría la pila lo que reduce la reproducción microbiana y por tanto la tasa de desinfección, por otro lado, también crea canales preferentes lo que genera zonas muertas impidiendo que se oxigene completamente la pila.

Para el método de la biodegradación los principales nutrientes que se usan son el fósforo y el nitrógeno; el primero es necesario para la formación de los ácidos nucleicos, y el segundo se utiliza para la síntesis de proteínas y la pared celular. Estos nutrientes presentan un par de problemas ya que el fósforo es poco soluble y no es muy fácil de encontrar en la naturaleza, además de esto el nitrógeno se puede perder rápidamente mediante la formación de lixiviados y nitritos.

Los siguientes factores son necesarios para lograr la efectividad de este método:

- Características de los contaminantes
- Características del suelo
- Condiciones climatológicas

Las biopilas admiten los siguientes parámetros:

- Concentración de HTP de entrada: hasta 50.000 mg/Kg, concentraciones mayores no permiten iniciar la biodegradación.
- Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son difícilmente degradables mediante las biopilas, la biodegradación elimina primero los hidrocarburos saturados seguido de los aromáticos y por último los asfáltenos.
- Las altas concentraciones de sales en el suelo pueden impedir la proliferación de los microorganismos, por esto la salinidad del suelo se mide con la conductividad con valores máximos de 2000 Us/cm.
- La concentración de bacterias debe ser al menos de 1000 UFC/g de residuo.

Como principales ventajas en las biopilas se cuenta con que en este método los contaminantes son destruidos y no pasan a ninguna otra condición, su diseño es bastante simple al igual que su construcción, según las características de efectividad estos procesos tardan de 3 a 6 meses, el costo de este tratamiento es relativamente bajo respecto a otras técnicas.

Las biopilas presentan una serie de limitantes los cuales bajan su competitividad respecto a la de otros tratamientos, esto se debe a que en este método no es posible tratar materiales que contengan metales pesados ya que esto no van a permitir el crecimiento de los microorganismos, además de esto no admiten concentraciones superiores a 50000 mg/Kg de hidrocarburos totales del petróleo. Por último, en este proceso no es posible degradar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). (Adriana Roldán Martín, 2002).

Ilustración 6: Biopilas.



Fuente: https://www.crhis-services.com/sub3/3_tratamientodecortesdeperforacion.pdf

- **Landfarming**

El Landfarming es un método que consiste en la biorremediación de los residuos mediante la estimulación de la actividad microbiana, esto se realiza mezclando una delgada capa de suelo con el material y extendiendo este. el material debe ser aireado mediante arado o simplemente el laboreo del terreno.

Es una tecnología de biorremediación de los suelos contaminados, lodos, o material con características de suelo mediante la cual los microorganismos generan materiales inocuos

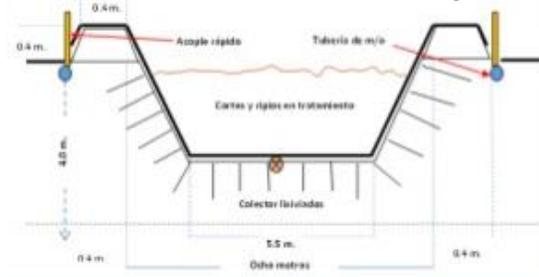
para el ambiente, o subproductos estabilizados que no presentan peligro. (MONTALUISA, 2018).

El material que se requiere para realizar esta mezcla deberá ser un suelo fértil que contenga una gran cantidad de bacterias; además de esto, se debe realizar en un terreno en el cual puedan ser controlados los lixiviados y toda la escorrentía proveniente de la descomposición de estos materiales, eso se hace mediante la instalación de membranas plásticas y de piletas que eviten la circulación de estas aguas y se conviertan en un foco de contaminación.

Los microorganismos, tales como bacterias, hongos, protozoarios, se alimentan de los contaminantes utilizándolos como fuente de crecimiento y de esta forma se convierten en materiales inocuos, estos procesos se estimulan mediante el mezclado periódico de los materiales. el fundamento técnico del Landfarming se basa en la degradación de fracciones livianas de hidrocarburos, por comunidades bacterianas. (MONTALUISA, 2018).

Este método presenta algunas observaciones, lo primero es que las condiciones del terreno a utilizar deben ser adecuadas y se requieren extensiones de terreno bastante grandes; además de esto el clima se convierte en un factor determinante, a la hora de definir el tiempo que puede demorar estos contaminantes en ser consumidos por los microorganismos, ya que este no es controlable.

Ilustración 7: Corte Piscina de Landfarming.



Fuente: <https://www.slideshare.net/MijailKirochka/curso-de-biorremediacion-cap-iv-seccion-41>

7.1.11. Tratamientos físicos

Gracias al cambio de fase y/o concentración se logran modificar los componentes peligrosos con el fin de mejorar su forma y composición para su manejo posterior, esto se hace gracias a las diferencias en las características como la densidad, presión de vapor, tamaño de partículas, etc. Rara vez son utilizados estos métodos como opción final de tratamiento para cualquier material contaminado. (Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013).

- **Ventilación**

Es considerado un método de eliminación pasiva, el suelo se vierte sobre una superficie impermeable maso menos una capa de 20 Cm y se espera a que los compuestos orgánicos volátiles se volatilicen, el riego ayuda a que los contaminantes se disuelven, además la humedad acelera la actividad de los microorganismos.

Es un proceso muy lento y poco viable ya que los contaminantes se disuelven directamente en la atmósfera, aunque es un proceso bastante económico siendo esta su principal ventaja.

- **Aglomeración con Alquitrán de Carbón**

En este proceso se usa un solvente con el fin de remover los contaminantes, se basa en el principio que los constituyentes oleosos son adsorbidos sobre la superficie de carbón, y el aglomerado carbón-orgánico que se forma es separado mediante una suspensión acuosa.

- **Lavado**

Este proceso consiste en poner en contacto el recorte con una solución de tensioactivos que son sustancias capaces de remover hidrocarburos y grasas, calentando la solución a una temperatura aproximada a los 70°C se favorece la separación de los hidrocarburos que pasan del suelo al líquido de lavado.

El líquido se mezcla con al agua en un equipo que mezcla y a su vez tritura el sólido mientras lo lava, la degradación del material apoya el proceso de separación física de la fase orgánica del mismo.

El agua usada debe tratarse regenerar la solución y reutilizarla en el proceso de lavado, generalmente en las actividades petroleras el agua es enviada a la planta de tratamiento del yacimiento.

Durante el proceso de lavado se utilizan grandes cantidades de agua y aditivos por lo que se recomienda realizar una prueba con el fin de elegir correctamente los aditivos para cada caso.

Se deben considerar los siguientes parámetros:

- Los altos porcentajes de humedad disminuyen la efectividad de la separación del contaminante, a veces es necesario usar más de un ciclo de lavado con el fin de separar todos los distintos tipos de contaminantes.
- El contenido de sólidos debe rondar entre el 50% y el 65%.
- No es efectivo para tratar suelos con más de 50% de arcillas y limos.
- Se ha logrado remover HTP y metales en un porcentaje del 90% y 98% agregando calor y surfactantes al agua de lavado.

7.1.12. Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos tienen como principal función modificar los compuestos contaminantes y peligrosos mediante reacciones químicas, de esta forma lo que se busca es eliminar o neutralizar los elementos peligrosos; en otros casos no es posible eliminar por completo estos residuos, pero se realiza el tratamiento para reducir el riesgo que puedan presentar, hasta un punto en que puede ser posible su manejo y posterior disposición. (Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 2013).

- **Oxidación Química**

Emplea sustancias oxidantes para destruir los componentes contaminantes, transformándolos en dióxido de carbono y agua, este proceso se encarga de eliminar compuestos como HTP, HAP, PCBs, entre otros.

Los agentes que actúan como oxidantes pueden ser:

- Permanganato (MnO_4).
- El peróxido de hidrógeno (H_2O_2).
- El ozono, entre otros.

Se obtiene una efectividad de degradación bastante altas, con concentraciones de HTP bastantes bajas, el peróxido de hidrogeno y el ozono degradan hidrocarburos, mientras que el permanganato se encarga de degradar compuestos clorados.

Las sustancias utilizadas en este proceso tienen características corrosivas, lo que indica riesgos para la salud humana y de explosión, debido a esto se deben tomar las precauciones necesarias de manejo de estas sustancias.

Se realizan ensayos de estequiométricos con el objetivo de determinar la cantidad de oxidante que debe ser utilizado y así optimizar la cantidad de estos, en concentraciones de hidrocarburos muy altas el tratamiento no es económicamente viable por lo que se requieren grandes cantidades de agente oxidante.

- **Extracción**

los componentes orgánicos se disuelven en el solvente, el recorte y el solvente se mezclan en un equipo que realiza la extracción del contaminante en el solvente.

Se utilizan diferentes tipos de solventes depende de las características del material se escoge el solvente óptimo, con un ácido remueve metales, con solventes orgánicos como la acetona, hexano, trietilamina, metanol, éter dimetílico, remueven compuestos orgánicos.

Una vez terminada la extracción el solvente junto con la mezcla de contaminantes se calientan con el fin de facilitar la separación, el solvente se recupera y se recircula hacia el equipo extractor.

Se deben considerar los siguientes parámetros:

- La eficiencia se ve reducida en suelos con un alto contenido de arcillas, debido contacto del solvente con el hidrocarburo.
- La extracción se ve afectado con sustancias orgánicas con un alto peso molecular.
- Los altos porcentajes de humedad permiten que más hidrocarburos se extraigan por lo tanto se recuperan menos hidrocarburos con el solvente.

- **Estabilización/Solidificación**

Esta técnica de tratamiento para el lodo y recorte de perforación lo que busca es estabilizar algunos componentes, adicionando al suelo cierta sustancia que controle e inhiba las reacciones químicas que se pudieran presentar. La estabilización consiste en la reducción del contaminante mediante una reacción química entre el agente estabilizador y el contaminante mientras que en la solidificación el compuesto contaminante se micro encapsula en una matriz sólida, con el fin de generar un producto inertizado.

Existen diferentes tipos de procesos:

- **Cemento y Cal:** El recorte se mezcla con cemento, cal y agua hasta formar una mezcla homogénea, esta mezcla forma silicato de calcio que estabiliza atrapando los contaminantes dentro de una estructura generada por el cemento.
- **Asfalto Emulsificador:** El residuo en un estado semi sólido se mezcla con una emulsión de asfalto lo que produce una que la emulsión se rompa y el agua se separa lo que a su vez forma una capa de asfalto tratando el residuo orgánico.
- **Bituminización:** El residuo se introduce dentro de bitumen fundido lo que encapsula el residuo cuando el bitumen se enfría.

Ilustración 8: Estabilización Cemento y Cal.



Fuente: <http://www.comcementos.com/Descargas/Cales/Manual%20de%20Estabilizacion%20de%20Suelos%20con%20Cal.pdf>

7.1.13. Otros Tratamientos

- **Atenuación Natural Monitoreada**

Estos procesos principalmente son la degradación biológica y la volatilización, mientras se monitorea la evolución de la concentración del contaminante en el residuo, la concentración de los contaminantes disminuye por los efectos de diversos procesos naturales,

Para la remediación del recorte, se requiere un análisis que determina si este proceso es el más adecuado, el estudio de biodegradabilidad natural incluye encontrar evidencia de que reacciones de 49 biodegradación ocurren en el sitio y realizar ensayos de laboratorio mostrando que los microorganismos autóctonos tienen la capacidad de degradar hidrocarburos, en las condiciones del lugar. Luego se debe medir la reducción del contaminante y la acción microbiana en el tiempo. (Ismirlian, 2018).

Es habitual que se use en zonas de temperaturas media-alta ya que favorecen la biodegradación, y para concentraciones no mayores al 3%, es un proceso que lleva cierto tiempo para lograr las concentraciones permitidas, por lo que debe estar sobre un material impermeable para evitar infiltraciones de lixiviados en caso de precipitaciones.

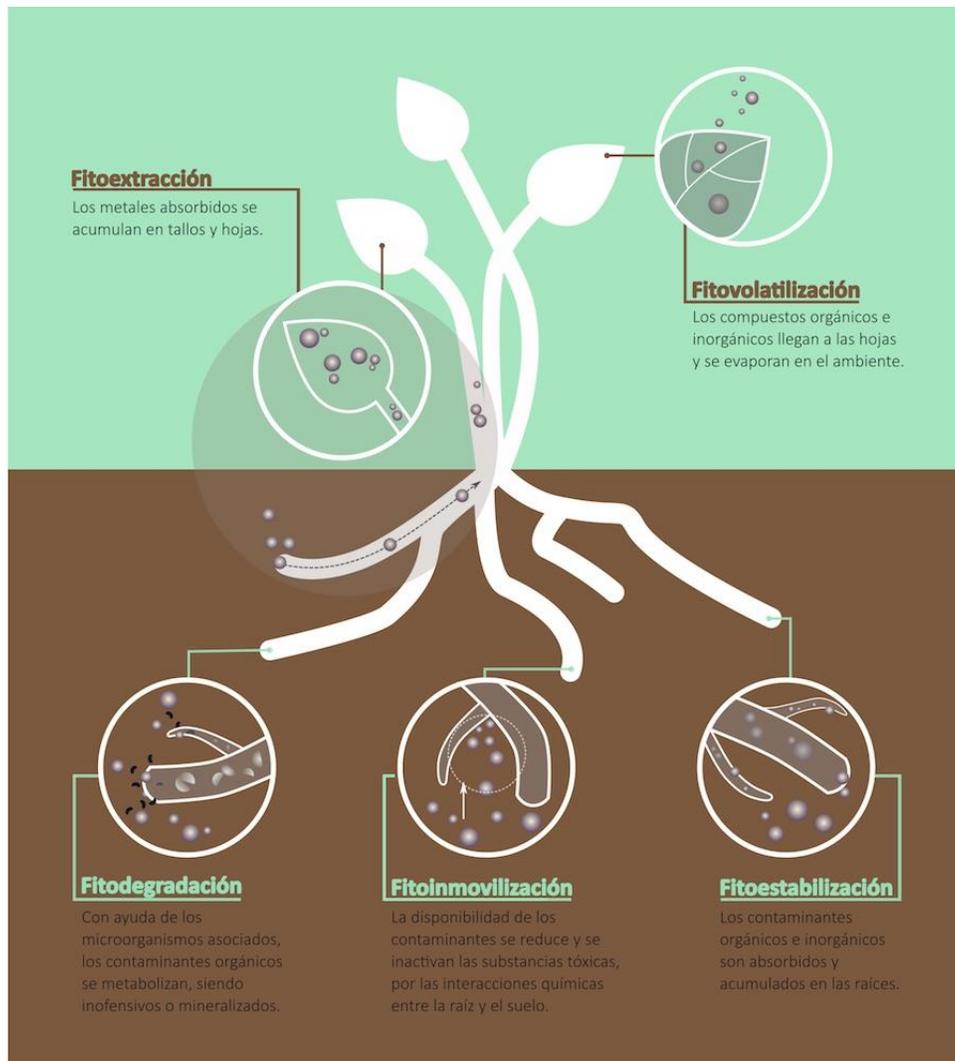
- **Fitorremediación**

Utiliza la capacidad de varias especies vegetales para sobrevivir en suelos contaminados con sustancias orgánicas o metales pesados, con el fin de acumular, inmovilizar, extraer o transformación de los contaminantes.

Los procesos que descontaminan el residuo son:

- Fitoextracción: Las plantas se cosechan y se incineran debido a que este proceso se basa en la absorción de los contaminantes en las hojas y tallos de estas.
- Fitodegradación: Los compuestos orgánicos que producen subproductos menos tóxicos son almacenados y posteriormente degradados.
- Fitoestabilización: Los contaminantes en el suelo presentan una reducción mediante la adsorción de estos.
- Fitoestimulación: Para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos) mediante la liberación de sustancias naturales de la planta se hace uso de los exudados radiculares.

Ilustración 9: Fitoremediación.



Fuente: <https://culturacientifica.com/2019/01/20/fitorremediacion/>

7.2. MARCO LEGAL

7.2.1. Normativa nacional relacionada con recortes de perforación

- **Decreto 1895 de 1973**

En el cual se dictan normas sobre explotación y exploración de petróleo y gas. Derogado por el decreto 3479 del 2009. En el artículo 94, en la sección 6 dice: Los desperdicios sólidos no combustibles deberán ser depositados en tierra. (REPUBLICA., 1973)

- **Decreto 2104 del 1983**

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título III de la Parte IV del Libro I del Decreto - Ley 2811 de 1974 y los Títulos I y XI de la Ley 9 de 1979 en cuanto a residuos sólidos.

Por la cual se define residuo sólido entendiéndose por esto como: todo objeto, sustancia o elemento en estado sólido, que se abandona, bota o rechaza, en su capítulo 1, artículo 1.

- **Decreto 1753 de 1994**

Por el cual se reglamentan parcialmente los Títulos VIII y XII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.

En su capítulo 4, artículo 23 párrafo 3, Para la perforación de cada pozo, se requerirá la presentación de un plan de manejo ambiental y sólo se procederá a ejecutar las obras con la aprobación de éste, entendiéndose que los recortes de perforación se basan sobre este artículo.

- **GUÍA DE MANEJO AMBIENTAL PARA PROYECTOS DE PERFORACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO Y GAS DE 1999**

Esta es una completa guía que dictamina los pasos a seguir en el buen manejo y las buenas prácticas que se deben tener con los pozos de perforaciones con hidrocarburos.

- **Decreto 838 de 2005**

Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.

En el título 2, capítulo 1, artículo 4 determina las áreas para la disposición final de residuos sólidos

- **Decreto 1616 de 2014**

Por el cual se establecen los criterios y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos convencionales continentales y costa afuera.

Menciona en su primer artículo los parámetros para la perforación y explotación de hidrocarburos, según el AGA, API, ASTM, NFPA, NTC ICONTEC, RETIE.

- **Decreto 2041 de 2014**

En el cual se reglamenta el título VIII de la ley 99 de 1993 sobre las licencias ambientales. (Colombia, 2016)

- **PLAN DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS EXPLORATORIOS HTER 310**

En el capítulo 4 (Manejo ambiental de la perforación de pozos exploratorios) en la sección 4.1.4.2 aparecen residuos de perforación (recortes de perforación), es indispensable que la empresa posea un plan de manejo para estos desechos.

- La entidad territorial en el proceso de formulación del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, seleccionará y establecerá las áreas potenciales para la disposición final de residuos sólidos.
- La entidad territorial realizará visitas técnicas a cada una de las áreas potenciales definidas en el PGIRS y con base en la información existente de generación de residuos sólidos optará por el normal cumplimiento. (ANGIE SUGGEY GÓMEZ VILLARREAL, 2018)

6.3. MARCO AMBIENTAL

Los residuos de las perforaciones petroleras consisten principalmente en roca triturada y restos de lodos de perforación, la función que cumple el lodo es lubricar y enfriar la broca, dar más estabilidad al pozo, además de controlar la presión y subir a la superficie los cortes de perforación. (Martinez, 2019).

A partir del año 1999 que fue emitida la guía denominada “Guía para Perforación de Petróleo y Gas” por el ministerio del medio ambiente de Colombia, en este se muestran los lineamientos para la gestión ambiental de los lodos de perforación, los lodos base agua en este momento son los más usados por la industria petrolera en Colombia, siendo los lodos base agua salada los de mayor problemática para tratar.

La guía describe principalmente 4 sistemas de lodos de perforación los cuales son los más usados en las actividades petroleras en Colombia.

- Lodo base Agua: Existen varias alternativas de manejo ambiental en función del área de perforación y su área de influencia.
- Lodo base Aceite: Principalmente diésel el cual se considera el de mayor impacto ambiental dada su composición química, por lo que no se recomienda su uso.
- Lodo base KCI (Cloruro de Potasio): Requiere tratamiento con el fin de reducir la salinidad, así como la aplicación de solventes lo cual incrementa los costos de operación.
- Sistema de Espuma: Están compuestos principalmente por detergentes químicos o polímeros, se elaboran con la inyección de agua y agentes espumantes dentro de una corriente de aire o de gas, lo que genera una espuma estable y algo viscosa o mediante una inyección de una base gel.

6.3.1. Composición

Los lodos de perforación tienen como principales componentes líquidos (agua, aceite u otro fluido orgánico), un material moderador (barita regularmente, BaSO₄), además de estos, con el fin de mejorar el rendimiento técnico del lodo, se utilizan químicos entre los que se puede encontrar los poliacrilatos, y otros polímeros orgánicos emulsionantes como el sulfato de alquilacrilato y óxido de polietileno también como agentes de control y floculantes.

La clase de aditivo que se usa depende de cada tipo de operación y el desarrollo de su perforación; los lodos de perforación se pueden clasificar en dos principales tipos según el líquido base como lo son: lodos a base de agua (WBM, principalmente contienen agua de mar) y los lodos en base aceite (OBM, principalmente compuestos por aceite diésel aceite mineral).

En estudios anteriores se ha podido comprobar que los fluidos de perforación base aceite son más utilizados en pozos de alta profundidad, presiones y temperaturas; representando así un aumento de 20 a 25% en los costos totales del pozo.

Cuando se utilizan fluidos en base aceite para una perforación, se tiene como principal restricción el elevado efecto ambiental. En el proceso de la perforación el aceite representa un contenido de aromáticos mayor al 22%, lo cual genera afectaciones directas a la fauna acuática, evita el crecimiento de capa vegetal y en el ambiente crea grandes fenómenos de contaminación, los cuales necesitan de tratamientos costosos para la recuperación del ambiente y así reducir el posible impacto generado por estos materiales. (Arévalo Peña, 2018).

Generalmente el diésel y el aceite mineral de origen hidrocarburo son los fluidos base aceite más utilizados, debido a esto en los años 90 inicia el uso de los fluidos en base sintético con el fin de no utilizar los tradicionales de aceite.

7. METODOLOGIA

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos se plantea una revisión respecto a la bibliografía del tema en base de datos y plataformas de común uso en ingeniería, identificando los estudios y avances que se tengan respecto a los métodos de tratamiento de suelos contaminados con lodos base hidrocarburo o agua.

Posteriormente se realizará un análisis de los diferentes ensayos para realizar la caracterización de los materiales elaborando una descripción de cada ensayo y de esta forma evaluar la mejor alternativa para su tratamiento según su composición.

Una vez analizado lo anterior y definidas sus propiedades índices, se buscará la viabilidad de su reutilización y sus diferentes posibles aplicaciones o usos en la industria constructora.

8. ENSAYOS

8.1. Humedad Natural (I.N.V.E – 122 – 13)

Objetivo:

Determinar el contenido de agua presente en una muestra de suelo.

Equipo:

- Horno de secado: con capacidad para mantener temperaturas constantes de 110+- 5°C.
- Recipiente de Muestreo: con capacidad para soportar altas temperaturas y resistente a la corrosión.
- Guantes contra altas temperaturas.
- Balanza de Precisión: con precisión de 0.01g.
- Herramientas Menores: Espátulas, Trapos de limpieza, Entre otros.

Otros Factores:

Muestreo y Almacenamiento: El muestreo es la fase más importante para la obtención de datos analíticos con el fin de poder hacer un dictamen lo más certero posible sobre el suelo en análisis. Su almacenamiento tiene que garantizar que la muestra conserve su humedad natural.

El tamaño de la muestra que las especificaciones recomienda está dado en función del tamaño máximo de las partículas presentes en la misma.

Tabla 3: Requisitos Sobre la Masa Mínima de los Especímenes de Ensayo.

| TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA (PASA 100 %) | | MÉTODO A | | MÉTODO B | |
|---|--------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| | | CONTENIDO DE AGUA REGISTRADO CON APROXIMACIÓN DE ± 1 % | | CONTENIDO DE AGUA REGISTRADO CON APROXIMACIÓN DE ± 0.1 % | |
| TAMAÑO TAMIZ (MM) | TAMAÑO TAMIZ ALTERNATIVO | MASA DEL ESPÉCIMEN | LECTURA DE LA BALANZA (g) | MASA DEL ESPÉCIMEN | LECTURA DE LA BALANZA (g) |
| 75.0 | 3" | 5 kg | 10 | 50 kg | 10 |
| 37.5 | 1½" | 1 kg | 10 | 10 kg | 10 |
| 19.0 | ¾" | 250 g | 1 | 2.5 kg | 1 |
| 9.5 | 3/8" | 50g | 0.1 | 500 g | 0.1 |
| 4.75 | No. 4 | 20 g | 0.1 | 100 g | 0.1 |
| 2.00 | No. 10 | 20 g | 0.1 | 20 g | 0.01 |

Fuente: Normas y Especificaciones de ensayos de suelos (I.N.V.E – 122 – 13).

Procedimiento:

- Un recipiente limpio será seleccionado con referencia y masa ya determinadas.
- En el recipiente depositar la muestra y pesar el conjunto (Recipiente+Muestra)
- El recipiente con la muestra se inserta dentro del horno, con una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por al menos 24 horas, hasta alcanzar una masa constante.
- La muestra es retirada del horno una vez se alcance el estado de masa constante y se deja secar o enfriar para luego determinar su peso seco.

8.2. Determinación del límite líquido (I.N.V.E – 125 – 13)

Objetivo:

Obtener los datos con los cuales se determinarán los siguientes parámetros del suelo

- Límite Líquido.
- Índice de Flujo.
- Primer parámetro para determinar el índice de plasticidad.

Equipo:

- Cazuela de Casa Grande: aparato usado para determinar el límite líquido de los suelos. compuesto por un cucharón de bronce fijada a un dispositivo de rotación que levanta y deja caer a cuchara unos 10mm lo que produce un golpe de rebote contra la base del aparato.
- Ranurador: generalmente este hecho de acero inoxidable y de forma plana o curva, con el cual se realiza una ranura en el material de ensayo.
- Balanza: con precisión de 0.01g
- Horno de secado: con capacidad para mantener temperaturas constantes de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamiz N°40
- Recipientes de aluminio.
- Espátula.
- Placa de Vidrio Esmerilado

Preparación de la Muestra:

Vía Húmeda

Con la ayuda de un tamiz asegurarse de que la muestra o contenga partículas superiores los 425 micrómetros, una vez este asegurado esta parte se procede a variar la humedad del material con ayuda de agua destilada de manera que se requieran entre 15 y 35 golpes para la realización del ensayo.

Procedimiento:

- Una porción de la muestra se coloca en la cazuela y se comprime y extiende, sin dejar burbujas de aire y que su profundidad máxima sea de 10mm. Se hace un corte con ayuda del ranurador de arriba hacia abajo logrando una ranura lo más uniforme posible.
- La cazuela es accionada a una velocidad aproximada de 2 golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la ranura cierre a lo largo de 13mm, la ranura se debe cerrar gracias al flujo del suelo y no al movimiento del mismo en la cazuela.
- Una porción del suelo presente en la cazuela se extrae asegurando que sea de ambos lados de la ranura y este se deposita en un recipiente de masa conocida, mientras que el suelo sobrante pasa a la zona de mezclado donde con ayuda de agua destilada se varia la humedad de este según sea necesario disminuir o aumentar el número de golpes.
- El ranurador y la cazuela se lavan y se realizan dos tanteos más.
- Los datos de los golpes deben estar en el rango de 25-35, 20-30, 15- 25.
- El peso del recipiente más la porción del suelo se mide y se registra, se introduce al horno para su secado y una vez alcanza su masa constante se registra el peso del suelo seco más el recipiente.

8.3. Determinación limite plástico e índice de plasticidad (I.N.V.E – 126 – 13)

Objetivo:

Determinar los datos con los cuales se puedan determinar el limite plástico y su respectivo índice de plasticidad.

Equipo:

- Placa de vidrio esmerilado
- Espátula
- Capsula para Evaporación: de preferencia de porcelana.
- Capsulas para determinar contenido de humedad.

- Balanza: con precisión de 0.01g
- Horno
- Calibrador

Preparación de la Muestra:

Con el suelo preparado para el ensayo de límite líquido se toma una porción de material mínimo de 15g, luego se varía su contenido de humedad hasta poder moldear fácilmente la muestra y formar rollos con las manos, la reducción de humedad se puede realizar con espátula por moldeo o exponiendo la muestra a corrientes de aire.

Procedimiento:

- La porción de muestra que se toma es de alrededor de 1,5 – 2g de la muestra preparada anteriormente.
- La muestra se apoya sobre la placa de vidrio y se procede a hacer rodar la muestra con ayuda de las manos, aplicando una fuerza constante con el fin de formar rollos.
- El rollo que se obtiene debe tener un diámetro uniforme y de aproximadamente 3.2 mm.
- Si el rollo no presenta grietas ni desmoronamiento esto indica que el material está por encima de su límite plástico, en este caso se junta de nuevo todo el material formando una esfera con las manos con el fin de reducir su contenido de humedad.
- Los pasos anteriores se repiten hasta lograr que en el rollo de diámetro de aproximadamente 3.2mm se presenten grietas y desmoronamiento.
- El rollo es colocado sobre un recipiente de masa conocida y se toma su masa total. (se debe poner dentro del recipiente al menos 6g de muestra).

8.4. Análisis granulométrico (I.N.V.E – 123 – 13)

Objetivo:

Determinar los datos para conocer los siguientes parámetros del material:

- Coeficiente de uniformidad.
- Coeficiente de curvatura
- Porcentaje de Gravas
- Porcentaje de Arenas
- Porcentaje de Finos
- Clasificación de suelos según el SUCS
- Curva Granulométrica

Equipo:

- Juego de Tamices: es necesario contar con el fondo y la tapa superior.

Tabla 4: Tamaño de Tamices.

| | |
|-----------------|-----------------------|
| 75 mm (3") | 2.00 mm (No. 10) |
| 50 mm (2") | 850 μ m (No. 20) |
| 37.5 mm(1-½") | 425 μ m (No. 40) |
| 25 mm (1") | 250 μ m (No. 60) |
| 19.0 mm (¾") | 106 μ m (No. 140) |
| 9.5 mm (3/8") | 75 μ m (No. 200) |
| 4.75 mm (No. 4) | |

Fuente: Normas y Especificaciones de ensayos de suelos (I.N.V.E – 123 – 13).

- Aparato Agitador: agitador mecánico que facilite el proceso de tamizado. De no contar con este equipo el proceso se puede realizar de manera manual.
- Horno de Secado
- Recipientes de Muestreo: preferiblemente de aluminio resistente a altas temperaturas y a la corrosión.
- Balanza: con precisión de 0.01g
- Cepillo de alambre
- Brocha de pelo delgado

Preparación de la Muestra:

- La humedad natural del material se debe mantener por lo que la variación de temperatura no debe ser mayor de $\pm 4^{\circ}\text{C}$, ni tener contacto con la luz solar.
- La muestra se prepara mediante el método de cuarteo una vez terminado el cuarteo se precede a separar la muestra en finos y gruesos lavando la muestra.
- El proceso del lavado consiste en hacer pasar el material por medio del tamiz 200 con ayuda de las corrientes de agua y al movimiento del tamiz, en el momento en que el agua sale translúcida a través del tamiz se vierte la muestra en un recipiente y se deja secar a temperatura ambiente.

Procedimiento:

A. Suelo retenido Tamiz No 10.

- La serie de tamices que se usaran son los tamices desde el No 10 hasta el No 3.
- El material se deposita desde la parte superior de la torre y se ajusta la tapa.

- EL proceso de tamizado se realiza ya sea de forma mecánica o manual.
- El material retenido en cada tamiz deberá ser pesado una vez el proceso de tamizado finalice; esto es con ayuda de la balanza.

B. Suelo Pasa Tamiz N0 10.

- En un recipiente de capacidad conocida se agregan 250ml de agua y se mezcla con el suelo, adicional se puede agregar 125 ml de hexametáfosfato el cual actuaría como agente dispersante.
- La mezcla se deja reposar la mezcla por un periodo de 12 horas como mínimo. Terminado este periodo de reposo se deposita la mezcla sobre el tamiz No 200 y se lava la muestra cómo se explicó anteriormente.
- La totalidad de la muestra se debe depositar en un recipiente limpio por lo cual se recomienda usar agua destilada por su se presenta adherencia de partículas.
- La muestra se llevará al horno a temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr masa constante posteriormente se dejará secar a temperatura ambiente o se pondrá en un desecador.
- Una vez la muestra se encuentre a temperatura ambiente se arma la torre de tamices desde el 20 hasta el 200 y se dispone el material por la parte superior.
- El proceso de tamizado se realiza, ya sea de manera manual o mecánica.
- El material retenido se pesará en cada una de las mallas con ayuda de la balanza.
- Este proceso se realiza pesando primero los tamices de mayor diámetro hasta llegar al de menor diámetro.

8.5. Permeabilidad (I.N.V.E – 130 – 13)

Objetivo:

Determina el coeficiente de permeabilidad mediante el método de cabeza constante, con el fin de determinar valores representativos del coeficiente de permeabilidad de los suelos.

Equipo:

- Permeámetros: con cilindros de diámetro, teniendo en cuenta la siguiente tabla.

Tabla 5: Tamaño de Cilindros.

| EL TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA SE ENCUENTRA ENTRE LOS TAMICES DE ABERTURAS | DIÁMETRO MÍNIMO DEL CILINDRO | | | |
|---|-------------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| | MENOS DE 35 % RETENIDO EN EL TAMIZ: | | MÁS DE 35 % RETENIDO EN EL TAMIZ: | |
| | 2.00 mm (No. 10) | 9.5 mm (3/8") | 2.00 mm (No. 10) | 9.5 mm (3/8") |
| 2.00 mm (No. 10) y 9.5 mm (3/8") | 76 mm (3") | - | 114 mm (4.5 mm) | - |
| 9.5 mm (3/8") y 19.0 mm (3/4") | - | 152 mm (6") | - | 229 mm (9") |

Fuente: Normas y Especificaciones de ensayos de suelos (I.N.V.E – 130 – 13).

- Tanque de cabeza constante con filtro.
- Embudos: bastante amplios.
- Equipo para compactación del espécimen: pistón de impacto.
- Bomba de vacío.
- Tubos manométricos con escalas métricas.
- Balanza: con capacidad de 2kg.
- Cucharón.
- Equipos Misceláneos: temo metros, reloj con apreciación de segundos, vaso graduado de 250ml, jarra de 1 L, cubeta para mezclar, cucharas.

Preparación de la muestra:

- La parte superior del suelo se nivela con ayuda de la placa porosa o la malla superior.
- La altura final de la muestra se mide y anota; estos valores se toman en cuatro puntos simétricamente dispuestos, el peso final secado al aire también debe tenerse en cuenta.
- Los pesos unitarios son calculados al igual que la relación de vacíos y el peso unitario relativo.
- Una bomba de vacíos aspira la muestra durante 15 minutos bajo 500mm de mercurio para remover el aire de los vacíos.
- La operación posterior a realizar es una saturación lenta de abajo hacia arriba, bajo vacío total, con el fin de liberar cualquier aire de la muestra, la saturación se puede mantener con ayuda de agua desairada.
- El permeámetro se llena de agua y se procede a cerrar la válvula del fondo y descontar el vacío.
- El tubo de admisión se llenará con agua y se conecta el tubo de admisión al tope del permeámetro.
- Las válvulas de salida y de admisión se abrirán para permitir que el agua fluya y así se eliminara el aire.

Procedimiento:

- La válvula de admisión del tanque filtrante se abre hasta que alcance una condición de cabeza constante.
- Los procedimientos se repiten con incrementos de cabeza de 5mm con el fin de establecer la zona de flujo laminar.
- El ensayo concluye drenando y examinando la muestra para establecer su homogeneidad.

8.6. Descripción e Identificación de Suelos (Procedimiento Visual y manual) (I.N.V.E – 102 – 13)

Objetivo:

Describir un procedimiento para llevar a cabo ensayos mediante un examen visual y manual del material, todo esto en base al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Importancia y uso:

Esta información descriptiva es importante ya que se utiliza para complementar los resultados obtenidos mediante ensayos convencionales de laboratorios; descritos en la norma INV E-181.

Equipo:

- Navaja de bolsillo o espátula pequeña.
- Tubo de ensayo con tapón.
- Lupas de diferentes tamaños.
- Agua, Ácido Clorhídrico.

Muestra:

Para los procedimientos que se van a realizar, la muestra, se deberá obtener mediante un proceso normalizado con el fin de obtener la muestra lo menos alterada posible; la cantidad de muestra que se debe obtener varía según el tamaño de las partículas del material.

Tabla 6: Tamaño de Partículas.

| TAMAÑO MÁXIMO DE LAS PARTÍCULAS (ABERTURA DEL TAMIZ) | | TAMAÑO MÍNIMO DE LA MUESTRA, PESO SECO AL AIRE |
|--|---------|--|
| NORMAL | ALTERNO | |
| 4.75 mm | (No. 4) | 100 g |
| 9.5 mm | (3/8") | 200 g |
| 19.0 mm | (¾") | 1.0 kg |
| 39.1 mm | (1 ½") | 8.0 kg |
| 75.0 mm | (3") | 60.0 kg |

Fuente: Normas y Especificaciones de ensayos de suelos (I.N.V.E – 102 – 13).

Procedimiento:

- El material es evaluado según sus características finas o gruesas realizando una identificación preliminar de la mayor cantidad de material con esta característica.
- El suelo de tipo fino presenta el siguiente procedimiento:
 - El material escogido debe ser aproximadamente un puñado; el cual no contenga partículas mayores al tamiz No. 40, a este material se le realizan las pruebas de resistencia seca, dilatancia y tenacidad.
 - La cantidad de material orgánico identificada la cual presenta generalmente color marrón oscuro a negro y algunas veces presentan olores, solo si esta contiene la cantidad para influir sobre las propiedades del material.
- Suelo de características gruesas presenta el siguiente procedimiento:
 - El porcentaje de suelo, tipo arena o grava, es estimado y se determina su porcentaje.
 - El porcentaje de finos dentro del material es estimado para clasificar el material.

8.7. Determinación de la Gravedad Específica de las Partículas Sólidas de los Suelos y del Llenante Mineral, Empleando un Picnómetro con Agua. (I.N.V. E – 128 – 13)

Objetivo:

Determinar la gravedad específica de los suelos que pasan el tamiz No 4.

Equipos y materiales:

- Picnómetro: Debe tener una capacidad mínima de 250 ml y su volumen deberá ser 2 o 3 veces mayor al de la mezcla de agua y material
- Bomba de vacío: Capaz de producir un vacío parcial de 100 mm de mercurio (Hg) de presión absoluta o menor.

- Horno: Con capacidad para mantener temperaturas constantes de hasta 110 +/- 5°C.
- Balanzas: Con legibilidad de 0,01g.
- Pipeta.
- Termómetro.
- Desecador.
- Recipiente aislante: Un recipiente de icopor o similar, con su tapa.
- Embudo.
- Tamiz de 4.75 mm (No.4).
- Mezclador.
- Botella plástica con atomizador.
- Mortero con maja de caucho.

Muestras y calibración:

La muestra obtenida puede ser ensayada en condiciones de humedad natural o se puede secar al horno, en la siguiente tabla se muestra la cantidad de material según el picnómetro a utilizar:

Tabla 7: Masa Según Picnómetro.

| TIPO DE SUELO | MASA DE LA MUESTRA SECA (g) CUANDO SE USA UN PICNÓMETRO DE 250 ml. | MASA DE LA MUESTRA SECA (g) CUANDO SE USA UN PICNÓMETRO DE 500 ml. |
|----------------|--|--|
| SP, SP-SM | 60 ± 10 | 100 ± 10 |
| SP-SC, SM, SC | 45 ± 10 | 75 ± 10 |
| Limo o arcilla | 35 ± 5 | 50 ± 10 |

Fuente: Normas y Especificaciones de ensayos de suelos (I.N.V.E – 128 – 13).

El picnómetro deberá estar vacío para de esta forma ser limpiado, secado y pesado; estas medidas se realizan 5 veces utilizando la misma balanza, se realiza la desviación estándar y esta debe ser menor a 0.02 g.

Procedimiento:

- El material seco se agrega al picnómetro con ayuda del embudo y agua destilada; no se deben dejar rastros ni partículas del material en el embudo ni en el cuello del picnómetro.
- Agua destilada se agrega en el picnómetro hasta más o menos la mitad de su volumen total.
- El aire de la lechada se extrae mediante el uso de la bomba de vacío.

- En el picnómetro con la lechada sin aire se agrega agua desairada.
- El picnómetro se pesa con la misma balanza utilizada para la calibración, posteriormente se mide la temperatura de la lechada usando el termómetro.
- La masa del suelo seco se determina dejando el material en un recipiente, ya pesado anteriormente y anotado su valor; es necesario lavar el picnómetro para no dejar restos de material, se le puede agregar más agua.
- El material se calienta a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ (hasta obtener masa constante) y se enfría posteriormente en un desecador. Se mide el peso del material resultante.

8.8. Consolidación Unidimensional de Suelos (I.N.V. E – 151 – 13)

Objetivo:

Determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de un suelo mediante pruebas de laboratorio en las que se permite el drenaje axial de especímenes confinados lateralmente, mientras se someten a incrementos de carga con esfuerzo controlado.

Importancia y uso:

El ensayo de consolidación es de gran importancia ya que ayuda a estimar la magnitud y velocidad de los asentamientos diferenciales y totales de una estructura o de un terraplén.

Equipo:

- Dispositivo de carga: Es un dispositivo adecuado para aplicar cargas axiales o esfuerzos totales a la muestra.
- Consolidómetro: Es un dispositivo que debe contar con un medio para sumergir la muestra en agua y para transmitir la carga concéntrica y medir la deformación axial, además de fijar la muestra en el dispositivo.
- Discos porosos: Deben permitir el paso del agua, pero no el paso de los finos.
- Pantalla filtrante: Se coloca entre el disco poroso y el espécimen con el fin de evitar la intrusión del suelo dentro de aquel.
- Deformímetro: para medir el cambio de espesor de la muestra.
- Placa espaciadora.
- Balanza: Con 4 dígitos significativos.
- Horno: el cual pueda mantener temperaturas de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Toma de muestras:

- Recolección: Las muestras deben ser inalteradas, se deben tomar las medidas de las normas INV E-105 e INV E-109.
- Transporte: El material se debe transportar según los parámetros de la norma INV E-103.

- Almacenamiento: Las muestras se deben almacenar selladas de tal manera que no se pierda la humedad con el fin de que no exista agrietamiento en la muestra.

Preparación de la muestra:

- Las alteraciones en la muestra como cambios de humedad, densidad, vibración, distorsión, compresión, etc. deben ser reducidos en lo más mínimo posible.
- La muestra se recorta de forma cilíndrica y se inserta el anillo de consolidación.
- La altura inicial de la muestra es medida y se calcula su volumen inicial.
- La humedad natural se determina, si se cuenta con el material necesario.

Procedimiento:

- La muestra es colocada en el consolidómetro, se coloca el anillo para fijarlo junto con los discos porosos y los filtros.
- El consolidómetro debe estar encerrado en una membrana plástica, posteriormente el consolidómetro se transporta al aparato de carga y se aplica una carga de alrededor 5 KPa; se debe tener ajustado el deformímetro y se registra la deformación inicial.
- La muestra se somete a esfuerzos axiales y se van incrementando según el método seleccionado.
- Método A: El tiempo estándar de aplicación de cada incremento de carga es de 24 horas, una vez aplicadas las cargas se toman suficientes lecturas para determinar la consolidación; en dos períodos se deben realizar tomas cada menos tiempo para verificar el estado de la consolidación.
- Método B: Los incrementos se realizan y se toman lecturas de deformación axial en intervalos de tiempo aproximadamente de 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas.
- En el desmonte se debe llevar la muestra nuevamente a la carga de asiento inicial, se mide la altura de la muestra tomando como mínimo cuatro medidas. Se determina la masa total de la probeta.
- La masa seca del espécimen se determina junto con el contenido de agua secando la muestra total al final del ensayo.

8.9. Corte Directo en Condición Consolidada Drenada (I.N.V. E – 154 – 13)

Objetivo:

Establecer el procedimiento para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada.

Equipo:

- Aparato de corte: El aparato de corte contiene la muestra entre dos piedras porosas, se debe permitir el drenaje del agua a través de estas y a su vez este aparato debe permitir sumergir la muestra en agua.
- Caja de corte: Es una caja provista de tornillos que se ajustan con el fin de controlar el espacio entre las dos mitades de esta caja.
- Piedras porosas: Tienen como función drenar el agua de la muestra y transmitir las cargas a esta.
- Mecanismo de carga: estos mecanismos son los encargados de aplicar la carga, entre ellos están los mecanismos para aplicar y medir la fuerza normal, mecanismo para cizallar la muestra, marco superior de la caja de corte, instrumento de medición de la fuerza normal, instrumento de medición de la fuerza de corte.
- Indicadores de deformación: diales o transductores capaces de medir el cambio de espesor del espécimen con precisión.
- Balanzas: con lecturas de 0,1%
- Equipo para la determinación del contenido de agua (INV E-122)
- Equipo para compactar muestras (INV E-141 o INV E-142)
- Equipo misceláneo: cronómetro, espátulas, cuchillos, reglas, sierras de alambre, etc.

Preparación de la muestra:

- Muestras inalteradas: Los especímenes deben ser obtenidos mediante muestras más grandes inalteradas; los especímenes deben ser manejados con cuidado para evitar cualquier tipo de alteración que se pudiesen presentar y que afectarán la calidad del procedimiento.
- Especímenes fabricados en el laboratorio: Los especímenes pueden ser fabricados dentro del laboratorio mediante la reconstrucción o por compactación, el material se debe mezclar con suficiente agua para establecer la humedad deseada y se permite estabilizar antes de preparar el espécimen.
- Especímenes reconstituidos: Se preparan con condiciones de contenido de humedad y densidad establecidos; así mismo, el método de compactación se escoge según sea necesario.
- Especímenes compactados: Estos procesos de compactación descritos en las normas INV E-141 e INV E-142 se pueden realizar para preparar los especímenes de ensayo; posteriormente estas muestras se pueden tratar como muestras inalteradas.

Procedimiento:

- La caja de corte y la cubeta son ensambladas en el marco de carga como primer paso.
- El instrumento de medición y la posición del sistema de carga se conectan y ajustan, deben ser tomadas las respectivas lecturas iniciales y se anotan dichos valores.
- Las placas de transferencia de carga junto con la piedra porosa se colocan en la parte superior del espécimen.
- Una pequeña carga normal se aplica al espécimen con el fin de verificar que todos los componentes del sistema están ajustados y alineados.
- La carga final para la consolidación se aplica en uno o varios incrementos según propiedades del material; posteriormente al momento de consolidación y antes de que ocurra la cizalladura se debe anotar el desplazamiento normal. Se debe abrir un espaciado con los tornillos de separación que no supere el tamaño de las partículas del espécimen.
- La velocidad a la cual se debe realizar el proceso debe ser relativamente baja, ya que esto hace que el exceso de presión de poros sea insignificante en la falla.
- La velocidad de desplazamiento varía según el aparato utilizado, se registra el tiempo inicial, el desplazamiento normal, el desplazamiento lateral relativo y las fuerzas normal y cortante.
- En materiales cohesivos se separan las mitades de la caja con movimiento a lo largo de la falla. Si las mitades se separan perpendicularmente a la superficie de falla puede presentar daños el espécimen, por lo que no se recomienda.
- El espécimen se retira de la caja de corte y se determina su humedad, el material también es extraído en un recipiente separado para determinar su masa.

8.10. Sistema de clasificación de los suelos SUCS

El sistema de clasificación de suelos (SUCS) se usa principalmente para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo; se puede utilizar en casi todos los materiales sin consolidar y con tamaños menores a tres pulgadas.

El tamiz N° 200 ayuda a crear una división de materiales según los porcentajes que pasan este tamiz; los materiales retenidos por este tamiz se denominan como suelos gruesos y los que pasan son los finos. los tipos de suelos se clasifican mediante el uso de letras que son las iniciales de los seis principales tipos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas).

La clasificación se divide así:

- Suelos gruesos: Los suelos gruesos se dividen en gravas y arenas; su medida es el tamiz N°4. Esto determina que si el 50% o más se retiene por este tamiz es grava, de lo contrario es arena.
 - Las gravas con porcentaje de fino de 5 a 12% utilizan símbolos dobles:

- GW-GM: grava bien gradada con limo
- GW-GC: grava bien gradada con arcilla
- GP-GM: grava mal gradada con limo
- GP-GC: grava mal gradada con arcilla
- Las arenas con 5 a 12% de finos utilizan estos símbolos:
 - SW-SM: arena bien gradada con limo
 - SW-SC: arena bien gradada con arcilla
 - SP-SM: arena mal gradada con limo
 - SP-SC: arena mal gradada con arcilla.
- Suelos finos: Las arcillas y los limos son los grupos predominantes; los cuales a su vez presentan divisiones según su límite líquido, si el límite líquido es menor de 50 se agrega la letra L (baja compresibilidad). si es mayor será una H (alta compresibilidad); los tipos de suelos que se pueden obtener son:
 - ML: limos inorgánicos de baja compresibilidad
 - OL: limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.
 - CL: arcillas inorgánicas de baja compresibilidad
 - CH: arcillas inorgánicas de alta compresibilidad
 - MH: limos inorgánicos de alta compresibilidad
 - OH: limos y arcillas orgánicas de alta compresibilidad
- Simbología utilizada por la clasificación SUCS

Tabla 8: Simbología SUCS.

| Tipo de Suelo | Prefijo | Subgrupo | Sufijo |
|----------------------|----------------|---------------------------|---------------|
| Grava | G | Bien gradada | W |
| Arena | S | Pobremente gradada | P |
| Limo | M | Limoso | M |
| Arcilla | C | Arcilloso | C |
| Orgánico | O | Límite líquido alto (>50) | L |
| Turba | Pt | Límite líquido bajo (<50) | H |

Fuente: <https://post.geoxnet.com/clasificacion-de-suelos/>

9. DISCUSION

Actualmente la extracción de hidrocarburos genera nuevos retos en términos ambientales, debido a los altos índices de contaminación que esta labor produce; teniendo en cuenta los avances tecnológicos, respecto a los métodos de tratamiento se debe considerar que las nuevas técnicas sean más amigables con el medio ambiente con el fin de garantizar el mayor porcentaje de eliminación de los contaminantes y así obtener una máxima aprovechabilidad de estos suelos contaminados.

Durante las actividades de perforación de pozos petroleros a nivel mundial se implementan fluidos base aceite y agua; en el contexto colombiano se tiene una tendencia a utilizar fluidos base agua, estos presentan menor impacto ambiental; en algunos países y en general la industria petrolera prefieren los fluidos en base aceite debido a su alta eficiencia en la perforación y la lubricación de los equipos y materiales; aunque su impacto ambiental es mayor.

9.1. GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO

Conociendo la gran variedad de métodos existentes para el tratamiento de los recortes de perforación a nivel mundial, se evidencia la importancia de analizar los parámetros más relevantes de los principales métodos de tratamiento, con el objetivo de determinar la viabilidad de su aplicación en los residuos a tratar según sus características y origen.

9.2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Este tipo de tratamiento es de los más eficaces a la hora de la remoción de hidrocarburos y de los hidrocarburos totales del petróleo presentando una eficiencia de entre un 95 y 99.99%, entre los cuales se presentan hidrocarburos volátiles y semivolátiles, se debe garantizar una humedad de entre 10 y 25%; el tipo de suelo con el que se trabaja principalmente son suelos con bajo contenido de arcilla aunque con el método de desorción es mas eficaz en suelos gruesos; debido a sus altos costos y permisos legales la incineración sólo se usa como última opción de tratamiento.

Generalmente tiene un tiempo de operación corto que oscila entre los 20 minutos y una hora según las propiedades del material y los tipos de contaminantes que se encuentren en este.

En estos métodos se utiliza combustible ya sea para calentar indirectamente el residuo a través de un horno o para calentar un aceite o un fluido térmico que a su vez transmita el calor al residuo, cabe resaltar que para el método de incineración el nivel utilizado de combustible es mucho mayor al requerido en otros tratamientos debido a las altas temperaturas que este requiere.

Los tratamientos térmicos en general presentan un bajo uso de agua debido a que esta solo es usada para enfriar el residuo una vez finalizado el proceso; durante el proceso las

emisiones son entre bajas y moderadas a excepción de la incineración el cual genera altas emisiones. Generalmente no es necesaria una gran área de trabajo para llevar a cabo, sin embargo, se necesitan altas medidas de seguridad ya que se trabaja con materiales inflamables y procesos que presentan riesgos para la salud humana.

Su inversión inicial es considerablemente alta, al igual que sus costos de operación y de mantenimiento, lo que hace que su mano de obra sea moderada. Su operación es intermitente, aunque el proceso se realiza de manera automática; se debe tener presente que el volumen final es igual al volumen inicial.

9.3. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos presentan mayor eficacia cuando el contaminante presente en el material es un hidrocarburo liviano y medios, usualmente se trabajó con un contenido de humedad medio entre un 15 y 25%; se tiene evidencia de su alta eficacia debido a que los hidrocarburos totales de petróleo al final del proceso varían entre el 0,1 y el 2%.

Se utiliza principalmente en suelos con alta y mediana permeabilidad ya que los suelos poco permeables requieren elementos o aditivos para aumentar la porosidad del soporte de la estructura; el tiempo de estos tratamientos es frecuentemente de años por lo que se considera que es de alta duración. Los lugares en los que se realizarán los procesos de remediación deben tener temperaturas cálidas.

Particularmente estos métodos de tratamiento necesitan grandes áreas de trabajo aunque esto no significa un aumento en la mano de obra debido a que estos sistemas funcionan de manera casi que automática y de manera continua; tienen bajas emisiones gaseosas debido a la evaporación y posibles emisiones líquidas como lixiviados principalmente en landfarming, tienen bajo consumo de agua ya que solo se requiere para el riego lo que genera un bajo impacto ambiental; cabe resaltar que el volumen del material generalmente es igual al final del proceso o algunas veces mayor si hay material de compostaje.

9.4. TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS

Generalmente estos métodos de tratamiento admiten cualquier tipo de suelo aunque existen algunos métodos como el lavado donde se trabaja principalmente con suelos con alto contenido de arcilla, son capaces de remover contaminantes como metales, hidrocarburos livianos a medianos y tanto volátiles como semivolátiles, con una efectividad muy alta del 99.99% en algunos tratamientos como la oxidación química pero generalmente con un porcentaje de hidrocarburos totales de petróleo de menos del 2.25%.

El tiempo varía dependiendo del tratamiento, habiendo métodos de corto, mediano y largo plazo, el clima del sitio es irrelevante teniendo la misma efectividad en cualquier clima.

La principal ventaja de estos tratamientos es su automatismo, lo que genera que la mano de obra necesaria sea moderada; los costos de operación y de mantenimiento son bajos o moderados, los procesos de operación son intermitentes y el área de trabajo requerida debe ser de un tamaño medio.

El volumen resultante, al final del proceso, es menor a la inicial, aunque durante el tratamiento la cantidad de agua utilizada generalmente es alta; sus emisiones son bajas y principalmente son líquidas.

9.5. DISPOSICIÓN FINAL

Teniendo en cuenta la información expuesta en este documento es importante verificar la metodología a seguir posterior al tratamiento de los recortes de perforación, en cuanto a su disposición y mantenimiento antes de ser dispuestos para el uso industrial.

Se debe tener un centro de acopio para el almacenaje temporal de los recortes ya tratados, el cual debe cumplir con unas condiciones mínimas para su correcto funcionamiento:

- Las dimensiones del centro de almacenamiento deben estar de acuerdo al volumen del material tratado y al tiempo de estadía.
- Con el fin de optimizar costos de operación y tiempo es necesario que la planta de tratamiento y el centro de almacenaje estén ubicados en la misma locación.
- La localización en la que se vayan a utilizar los materiales ya tratados deberá estar lo más cerca posible a el sitio donde se generan estos.

Al momento de su aplicación, se deben tener en cuenta una serie de consideraciones:

- Se debe desarrollar de una manera tanto responsable como prudente.
- La disposición no debe producir erosión por lo que se debe contar con la vegetación necesaria para contener el flujo del líquido y el terreno debe estar nivelado.
- No se debe disponer sobre tierra granular ya que se aumenta el riesgo de contaminación de corrientes de agua subterránea.
- Se deben realizar estudios sociales, técnicos, económicos y ambientales en la localización de la aplicación.

9.6. USOS Y APLICACIONES

El producto final de los métodos de tratamiento, aplicado a los recortes de perforación, puede ser utilizado de forma industrial siempre y cuando se cumplan los requisitos de contaminantes mínimos exigidos en las normativas vigentes en Colombia; algunos de los posibles usos que se le pueden dar a estos materiales son:

- Construcción de nuevos pozos: Se deben realizar los respectivos ensayos de rigor con el fin de verificar la posibilidad de utilizar estos recortes como material de relleno para construcción de locaciones.
- Relleno de pavimentos: Teniendo en cuenta la humedad óptima para lograr la compactación correcta, junto con cemento, como lo exigen los ensayos de la ASTM, puede ser utilizado en estacionamientos o bodegas de almacenaje.
- Construcción de ladrillos
- Mezclado con bentonita: Se utiliza para impermeabilización.
- Confinamiento controlado: Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - Seleccionar bien la ubicación.
 - Recubrimiento apropiado.
 - Monitoreo de aguas subterráneas y lixiviados.
 - Construcción y operación según los lineamientos.

10. CONCLUSIONES

- Se describieron y definieron algunos de los principales tratamientos que son usados por la industria petrolera a nivel nacional e internacional, cuyo fin está asociado al proceso de disposición final en pro de la comunidad.
- A partir de la bibliografía consultada se pudo describir los procedimientos necesarios para realizar la caracterización de los recortes de perforación evidenciando sus posibles aplicaciones en ingeniería.
- En base a las normas y especificaciones de ensayos para materiales de carreteras (I.N.V.E.) se lograron describir los ensayos básicos de caracterización para el material resultante del tratamiento.
- A nivel mundial se puede concluir que los métodos de pretratamiento varían según las características del material y el tratamiento seleccionado; el método más utilizado generalmente es mediante zarandas, desarenadores y centrífugas con el fin de lograr un porcentaje de humedad menor al 10% lo que aumenta sus alternativas de tratamiento.
- Evaluando los diferentes tipos de tratamientos para los residuos se determinó que el Landfarming es el método de tratamiento más económico seguido por las biopilas, por otro lado, requiere de un control permanente, los tiempos de tratamiento son bastante largos y su mayor eficiencia se evidencia en ambientes menos húmedos o en estaciones de primavera y verano.
- En los tratamientos físicos y químicos, el proceso de lavado de suelos es una tecnología bastante utilizada debido a su sencillez y su moderado costo de operación

además el agua utilizada durante el lavado puede ser llevada de nuevo a la planta para ser reutilizada.

- La oxidación química presenta una gran desventaja al utilizar una gran cantidad de químicos y agua lo que hace que su aprobación por parte del ente ambiental regulador sea bastante compleja; además de presentar altos costos.
- Se evidencia que en los tratamientos térmicos el método de incineración es demasiado costoso en términos operación e inversión por lo que solo es aplicado como última opción de tratamiento debido también a su alto impacto ambiental; por otro lado, la desorción termo mecánica es un método más seguro ya que su equipo no está sometido al fuego directo por lo que no se requiere un estricto seguimiento.
- Teniendo en cuenta los tratamientos descritos en este informe, se evidencia que la concentración de contaminantes posterior al tratamiento, es menor al 2.25% en su mayoría.
- Los usos más comunes aplicados a estos materiales una vez tratados; se centran principalmente en estructuras de relleno, muros de contención, construcción de ladrillos, construcción de caminos y productos de revestimiento entre otros, siempre y cuando se cumplan las especificaciones de las normas regulatorias.

11. RECOMENDACIONES

- Es de gran importancia ampliar los conocimientos sobre los riesgos ambientales con el fin de ampliar y mejorar estrategias para la mitigación de los impactos generados en la disposición final de los recortes.
- Se recomienda ampliar la investigación sobre cada método de tratamiento antes de su aplicación con el fin de conocer todos los riesgos, costos y futuras características que podría tener el material.
- Para ampliar los posibles usos de los materiales es recomendado realizar otros ensayos como densidad óptima, compactación, expansividad, CBR.
- Con el fin de definir la mejor alternativa de tratamiento del material se considera importante realizar los ensayos pertinentes para conocer la cantidad, calidad y clasificación de los contaminantes presentes.

12. BIBLIOGRAFIA

Referencias

- Adriana Roldán Martín, R. I. (2002). *SANEAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS MEDIANTE BIOPILAS*. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- ANGIE SUGGEY GÓMEZ VILLARREAL, J. X. (2018). *METODOLOGÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN BASE AGUA Y SU POSIBLE USO INDUSTRIAL EN COLOMBIA. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y FACTIBILIDAD ECONÓMICA*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- aprendeconenergia. (6 de 7 de 2011). *https://www.aprendeconenergia.cl/*. Obtenido de <https://www.aprendeconenergia.cl/>: <https://www.aprendeconenergia.cl/diesel>
- Arévalo Peña, J. J. (2018). *Valoración de alternativas de tratamiento de fluidos de perforación en la industria petrolera*. Bogota D.C: Universidad Militar Nueva Granada.
- BAUTISTA PUENTE, L. (2010). *Manejo de desechos y deshidratación (dewatering) de los fluidos de perforación base agua*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de ingeniería de petróleo, gas natural y petroquímica.
- Beltran, A. M. (2019). *ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL USO DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN EN LA CREACIÓN DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL*. Bogota : Fundacion Universidad de America.
- Beltran, A. M. (2019). *Estudio de viabilidad del uso de recortes de perforación en la creación de mampostería estructural*. Bogotá: Fundación Universidad de América.
- BONILLA, M. L. (2013). *RECUPERACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS PRESENTES EN LOS RESIDUOS Y PASIVOS AMBIENTALES GENERADOS POR LAS ACTIVIDADES PROPIAS DE LA INDUSTRIA PETROLERA POR MEDIO DE DESORCIÓN TÉRMICA*. BUCARAMANGA: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
- conceptodefinicion. (16 de 5 de 2013). *https://conceptodefinicion.de*. Obtenido de <https://conceptodefinicion.de>: <https://conceptodefinicion.de/humedad/>
- consumer. (19 de 8 de 1999). *https://www.consumer.es*. Obtenido de <https://www.consumer.es>: <https://www.consumer.es/medio-ambiente/contaminacion-por-lixiviados.html>
- CYNDY ARGOTE SIERRA, J. A. (2011). *COMPARACIÓN TÉCNICA DEL MÉTODO ENDRILL CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN*. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
- Definicion. (18 de 5 de 2006). *https://definicion.de/*. Obtenido de <https://definicion.de/>: <https://definicion.de/composicion/>
- diccionario.motorgiga. (30 de 6 de 2009). *https://diccionario.motorgiga.com/*. Obtenido de <https://diccionario.motorgiga.com/>:

- <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/lubricantes-definicion-significado/gmx-niv15-con194694.htm>
- eiticolombia. (2016). <http://www.eiticolombia.gov.co/>. Obtenido de <http://www.eiticolombia.gov.co/>: <http://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-legal-y-regimen-fiscal/marco-normativo-del-sector-de-hidrocarburos/>
- ESPAÑOLA, R. A. (9 de 8 de 1999). <https://dle.rae.es/>. Obtenido de <https://dle.rae.es/>: <https://dle.rae.es/volatilizar>
- ESPINOSA, A. Q. (2013). *Desarrollo de un proceso para el acondicionamiento de los cortes de perforación como fertilizante de un campo petrolero*. Bogota D.C.: Fundación Universidad de América.
- fao. (14 de 8 de 2009). <http://www.fao.org>. Obtenido de <http://www.fao.org>: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- Francisca, F. (2010). *Comportamiento de limos loessicos contaminados con hidrocarburos estabilizados y solidificados con cemento portland*. Cordoba: boletín geológico y minero.
- Genome, N. H. (26 de 8 de 2002). <https://www.genome.gov/>. Obtenido de <https://www.genome.gov/>: <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Bacteria>
- GreenFacts. (17 de 8 de 2008). <https://www.greenfacts.org/>. Obtenido de <https://www.greenfacts.org/>: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/contaminante.htm>
- INFANTE, H. E. (2017). *INNOVACIÓN Y DESARROLLO EN EL TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACION*. Bogota D.C.: FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- ingeoexpert. (24 de 08 de 2018). <https://ingeoexpert.com>. Obtenido de <https://ingeoexpert.com>: <https://ingeoexpert.com/2018/08/24/acuifero-aguas-subterranas/?v=42983b05e2f2>
- Ismirlian, P. L. (2018). *EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE TRATAMIENTO PARA RECORTES DE PERFORACION DE POZOS PETROLEROS CON LODO BASE DE HIDROCARBURO EN ARGENTINA*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Tecnológico de Buenos Aires.
- Lagrecá, M. D. (1996). Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos, Vol II. En M. D. Lagrecá, *Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos, Vol II* (págs. 743-807). MC Grawhill.
- López, I. M. (2008). Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos mediante la utilización de cal viva. *Revista de divulgación KUXULKAB*, 51.
- Maroto, M. E. (2000). *Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos*.
- Martínez, A. C. (2019). *RIESGOS AMBIENTALES SOBRE AGUA Y SUELO POR DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN EN EL CAMPO CASTILLA*. Bogota: Fundación Universidad de América.
- Mendoza, A. (29 de septiembre de 2012). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/DarkYoshi0307/el-petroleo-e-hidrocarburos>

- Mexicano, S. G. (22 de 03 de 2017). <https://www.sgm.gob.mx/>. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/>: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientos-minerales.html
- MONTALUISA, E. P. (2018). *BIOTECNOLOGÍAS APLICADAS AL TRATAMIENTO Y REMEDIACIÓN DE RIPIOS DE PERFORACIÓN*. LA LIBERTAD: UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA.
- Naval Facilities Engineering Service Center. (1998). *Application guide for thermal desorption systems*. California: Naval Facilities Engineering Service Center.
- ORESHKIN, D., & CHEBOTAEV, A. &. (2015). *Disposal of Drilling Sludge in the Production of Building Materials*. Procedia Engineering.
- PAREX. (2014). *Informe de Sostenibilidad 2014*. Bogotá: PAREX.
- PEÑA, J. J. (2018). *VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA*. Bogota : Universidad Militar Nueva Granada.
- Press, E. (14 de 10 de 2014). <https://www.mejorinformado.com/>. Obtenido de <https://www.mejorinformado.com/>: <https://www.mejorinformado.com/petroleo/2014/10/14/depsitos-definicion-tipos-pozos-petroleros-8566.html>
- Quirama, M. A. (2012). *Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia*. Medellin: Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- REPUBLICA., C. D. (1973). *Decreto 1895, Por el cual se dictan normas sobre exploración y explotación de petróleo y gas*. Bogotá. D. C.: DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE LA PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA.
- responsabilidadsocial. (02 de 3 de 2020). <https://www.responsabilidadsocial.net/>. Obtenido de <https://www.responsabilidadsocial.net/>: <https://www.responsabilidadsocial.net/residuos-que-son-definicion-clasificacion-manejo-y-ejemplos/>
- Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias. (2013). *MANEJO INTEGRAL DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN TABASCO*. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, Vol. 2, Núm. 4 .
- SCHINITMAN, N. (15 de Marzo de 2018). *ecoportal*. Obtenido de ecoportal: https://www.ecoportal.net/temasespeciales/contaminacion/metales_pesados_ambiente_y_salud/
- scielo.conicyt. (24 de 04 de 2006). <https://scielo.conicyt.cl>. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl>: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000100009
- Sergio A. Vardaro, J. A. (2018). *Recortes de perforación de la industria petrolera generados en el Oeste de Argentina: caracterización y alternativas de tratamiento*. Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.

significados. (07 de 08 de 2019). <https://www.significados.com>. Obtenido de <https://www.significados.com>: <https://www.significados.com/soluto-y-solvente/>

Uriarte, J. M. (09 de 09 de 2019). *Caracteristicas.co*. Obtenido de *Caracteristicas.co*: <https://www.caracteristicas.co/hidrocarburos/>

VALBUENA, M. O. (2016). *MANEJO AMBIENTAL DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE LOS FLUIDOS BASE UTILIZADOS EN LA PERFORACIÓN DE ALGUNOS POZOS PETROLEROS EN COLOMBIA*. BOGOTA D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA .