

**ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN BASE
AGUA GENERADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA APLICACIÓN A UN CASO
COLOMBIANO**

JORGE MARIO MOLANO GARCÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2023**

**ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN BASE
AGUA GENERADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA APLICACIÓN A UN CASO
COLOMBIANO**

JORGE MARIO MOLANO GARCÍA

Trabajo de grado para optar título de Especialista en Gerencia de Hidrocarburos

Director:

ZULY CALDERÓN CARRILLO

Doctora en Ingeniería, Escuela de Ingenieros

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2023**

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado a todas las personas que siempre han creído en mí, aquellas que con su cariño y amor han logrado darme las fuerzas necesarias y el apoyo incondicional para la realización de este trabajo.

A mi madre por ser la mujer más maravillosa de este mundo, por ser el amor de mi vida, por apoyarme en cada decisión y proyectos de mi vida. Gracias a ti mamá por demostrarme lo hermosa que es la vida y por dejarme vivirla. Gracias a tus aportes de amor, bondad y apoyo, me has permitido culminar con excelencia el desarrollo de esta tesis.

A mi padre por darme el mejor ejemplo de padre, hijo y amigo que se puede tener, por sus consejos, sus valores y motivación constante para ser de mí una mejor persona. Tú me has enseñado a luchar por mis sueños, a ser perseverante, a ser un hombre fuerte, lleno de valores para salir adelante y cumplir mis metas. Gracias, padre por tu cariño, amor y confianza depositada en mí.

A mi hermana por ser la mejor compañía, por estar siempre en los buenos y malos momentos de mi vida. Gracias por la confianza y apoyo que siempre me das. Gracias a ti hermana por tantas enseñanzas.

Por último, no menos importantes a todos aquellos que de alguna forma participaron directa e indirectamente en la elaboración de esta tesis. ¡Solo me queda decirles Gracias!

Jorge Mario Molano García

Ingeniero de Petróleos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme la oportunidad de culminar tan importante etapa en mi vida profesional, de igual forma, quiero agradecer a todas las personas que lograron que el desarrollo del trabajo de grado fuera posible, en especial a la Doctora Zuly Calderón por su tiempo, por su compromiso y dedicación como directora de la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. TIPOS DE RESIDUOS GENERADOS HABITUALMENTE EN LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN DE POZOS.....	14
2.1. PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS.....	14
2.1.1. Perforación Spring-Pole	14
2.1.2. Percusión o perforación con cable	15
2.1.3. Perforación rotativa	16
2.2. RESIDUOS GENERADOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS.....	17
2.2.1. Lodos de Perforación	18
2.2.2. Cortes de Perforación.....	25
2.2.3. Agua de Sentina y de Lastre	31
2.2.4. Drenaje de Cubierta	31
2.2.5. Otros Residuos.....	31
3. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ACTUAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE CORTES DE PERFORACIÓN EN COLOMBIA EN COMPARAR CON LA INTERNACIONAL. ...	32
3.1. NORMATIVA COLOMBIANA.....	33
3.1.1. Decreto 838 de 2005	33
3.1.2. Decreto 4741 del 2005	40
3.1.3. Resolución 18 1495 de 2009.....	42
3.1.4. Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas.....	42
3.2. NORMATIVA INTERNACIONAL.....	47
3.2.1. Indonesia.....	48
3.2.2. Arabia Saudí.....	50
3.2.3. Estados Unidos	55
3.2.4. Canadá.....	62
3.2.5. Comparación de Opciones de Gestión de Residuos de perforación	66

4.	ALTERNATIVAS PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE CORTES DE PERFORACIÓN BASE AGUA.	71
4.1.	JERARQUÍA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS	71
4.2.	DISPOSICIÓN FINAL DE CORTES DE PERFORACIÓN	73
4.2.1.	Disposición Offshore	73
4.2.2.	Disposición Onshore	78
4.3.	MANEJO DE CORTES CONTAMINADOS CON SAL	90
4.4.	FACTORES QUE AFECTAN LAS OPCIONES DE DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN	91
5.	VIABILIDAD DEL USO DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN PREVIAMENTE TRATADOS, EN LA INDUSTRIA PETROLERA O EN OTRO TIPO DE INDUSTRIA APLICADO A UN CASO COLOMBIANO	93
5.1.	REUTILIZACIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN.....	93
5.2.	IDENTIFICACIÓN DE OPCIONES PARA EL RECICLAJE DE CORTES DE PERFORACIÓN.....	103
5.3.	NORMATIVA PARA LA REUTILIZACION DE CORTES DE PERFORACIÓN 105	
5.3.1.	Consideraciones de Cumplimiento Normativo.....	105
5.4.	APLICACIÓN A UN CASO COLOMBIANO	106
6.	CONCLUSIONES.....	113
7.	RECOMENDACIONES.....	115
	BIBLIOGRAFIA	116

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ensamble de perforación tipo Spring – Pole.	15
Figura 2. Diagrama conceptual esquemático del procedimiento de perforación por percusión.....	16
Figura 3. Mesa rotaria	17
Figura 4. Zaranda Vibratoria.....	22
Figura 5. Separador de gas.....	23
Figura 6. Centrifugas y desarenadores	24
Figura 7. Proceso de desorción térmica	29
Figura 8. Manejo ambiental de residuos de perforación.....	44
Figura 9. Opciones para la disposición de cortes de perforación.	47
Figura 10. Jerarquía de disposición final de residuos.	72
Figura 11. Fosas de desechos de campos petroleros.....	80
Figura 12. Landfills de residuos de campos petroleros	82
Figura 13. Técnica Land-spray de cortes de perforación	85
Figura 14. Mix-bury-cover (MBC).	87
Figura 15. Operación típica de Land farming.	88
Figura 16. Diagrama de flujo de las alternativas de reutilización de residuos.	101

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Ocupación del área.....	34
Cuadro 2. Accesibilidad vial	35
Cuadro 3. Condiciones del suelo y topografía.....	36
Cuadro 4. Disponibilidad de material de cobertura.....	37
Cuadro 5. Densidad poblacional	37
Cuadro 6. Incidencia en la congestión del tráfico	38
Cuadro 7. Distancia a cuerpos hídricos.....	38
Cuadro 8. Dirección del viento	39
Cuadro 9. Geoformas de las áreas	39
Cuadro 10. Concentraciones máximas de contaminantes para prueba TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure).....	40
Cuadro 11. Alternativas para disposición de residuos sólidos	44
Cuadro 12. Parámetros TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure)	48
Cuadro 13. Estándares nacionales de calidad del aire	52
Cuadro 14. limitaciones de descarga de efluentes según MEPA.....	53
Cuadro 15. Límites permisibles de metales presentes en el residuo.....	60
Cuadro 16. Parámetros adicionales en zonas poco inundables.....	61
Cuadro 17. Parámetros adicionales en zonas altas	62
Cuadro 18. Métodos de disposición Directiva 50 de Alberta.....	65
Cuadro 19. Comparación de las opciones de gestión de residuos de una muestra representativa de países, estados y provincias (x indica que las opciones están permitidas).....	67
Cuadro 20. Comparación de la gestión de residuos sólidos en Colombia con el resto del mundo	69
Cuadro 21. Ventajas y desventajas de descarga Offshore.	74
Cuadro 22. Ventajas y desventajas de reinyección de cortes en alta mar.	77

Cuadro 23. Criterios de evaluación	103
Cuadro 24. Análisis de suelos	107
Cuadro 25. Comparación frente a Protocolo Louisiana 29-b.....	108
Cuadro 26. Análisis de lixiviados.....	110
Cuadro 27. Comparación frente a Decreto 4741 de 2005.....	110

RESUMEN

TÍTULO: ALTERNATIVAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN BASE AGUA GENERADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA APLICACIÓN A UN CASO COLOMBIANO

AUTOR: JORGE MARIO MOLANO GARCÍA

PALABRAS CLAVE: Cortes, residuos, perforación, tratamiento, disposición, normativa,

DESCRIPCIÓN: La industria de los hidrocarburos, así como muchas otras industrias, han estado bajo el escrutinio de organizaciones ambientales y reguladores gubernamentales, con respecto al manejo de productos químicos y desechos de campos petroleros.

El mayor volumen de desechos producidos en las operaciones de perforación son los cortes perforados, la regla general al usar unidades tradicionales de campo es calcular el volumen aproximado de cortes generados en barriles por cada 1.000 pies de profundidad duplicando el tamaño del agujero, por lo tanto, se tiene que, para un pozo de 12 1/4 pulgadas, se producen alrededor de 150 bbl de cortes por cada 1.000 pies, lo que quiere decir que para una sola operación de perforación de 10.000 pies se pueden generar alrededor de 1.500 bbl (239 m³) de cortes.

El siguiente trabajo pretende plantear alternativas para la reutilización de cortes de perforación base agua generados en la industria petrolera aplicado a un caso Colombiano, para el desarrollo del mismo se realizarán análisis de laboratorio, como temperatura, pH, conductividad eléctrica y contenido de agua de los cortes previamente tratados y dispuestos de una empresa prestadora de servicios, con el fin de determinar de acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio, cual es la mejor opción para reutilizar dichos cortes, contribuyendo al gerenciamiento del desarrollo sostenible particularmente en el área ambiental y social.

ABSTRACT

TITLE: ALTERNATIVES FOR THE REUSE OF WATER- BASED DRILLING CUTS GENERATED IN THE OIL INDUSTRY APPLICATION TO A COLOMBIAN CASE.

AUTHOR: JORGE MARIO MOLANO GARCÍA

KEY WORDS: Cuttings, waste, drilling, treatment, disposal, regulations, recycling.

DESCRIPTION: The hydrocarbon industry, as well as many other industries, has come under scrutiny from environmental organizations and government regulators, regarding the handling of chemicals and waste from oil fields.

The largest volume of waste produced in drilling operations is drilled cuts. The general rule when using traditional field units is to calculate the approximate volume of cuts generated in barrels per 1,000 feet of depth doubling the size of the hole; therefore, you have that, for a 12 ¼ inch well about 150 bbl of cuts occur per 1,000 feet. This means that for a single 10,000-foot drilling operation, about 1,500 bbl (239 m³) of cuts can be generated.

The following project aims to propose alternatives for the reuse of water-based drilling cuts generated in the oil industry applied to a Colombian case. For the development of the same, laboratory analyses will be carried out, such as, temperature, pH, electrical conductivity and water content of cuts previously treated and arranged of a company providing services, in order to determine according to the results obtained in the laboratory, which is the best option to reuse these cuts, contributing to the management of sustainable development, particularly in the environmental and social area.

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo hoy en día produce gran cantidad de residuos en particular los provenientes de las actividades propias de la perforación como lo son los cortes perforado con lodo base agua asociados a dicha actividad. La exploración de nuevos campos, así como la explotación de campos existentes, requiere operaciones de perforación de pozos. Junto con la tarea continua de reducir los costos del programa de perforación, se encuentra la búsqueda de soluciones de disposición de los fluidos y cortes de perforación asociados que sean inteligentes en cuanto a costos y ambientalmente amigables. Una de las alternativas para disponer dichos residuos consiste en mezclar los cortes con suelo nativo para luego distribuirlos uniformemente sobre un área abierta, sin embargo, aunque es una de las formas menos costosas, es la que mayor área demanda para dicho propósito.

La opción y la viabilidad de reutilización beneficiosa de los cortes de perforación dependen en gran medida de la estructura y el desarrollo regulatorios en referencia a la exploración y producción de petróleo y gas dentro del país o estado específico.

Una empresa de servicios petroleros cuenta con terrazas clausuradas de cortes de perforación base agua y con una capacidad de almacenamiento cada vez más reducida, a medida que aumentan las campañas de perforación. Es por ello que, en este trabajo se pretende plantear alternativas para la reutilización de cortes de perforación base agua generados en la industria petrolera, con el fin de aprovechar este material previamente tratado, en otro tipo de actividades propias o no de la industria de hidrocarburos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Plantear alternativas para la reutilización de cortes de perforación base agua generados en la industria petrolera aplicación a un caso colombiano.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los tipos de residuos generados habitualmente en las actividades de perforación de pozos.
- Analizar la normativa actual de disposición final de cortes de perforación en Colombia y comparar con la internacional.
- Revisar las diferentes alternativas para la disposición final de cortes de perforación base agua.
- Evaluar según los resultados del análisis de laboratorio la viabilidad del uso de los cortes de perforación previamente tratados, en la industria petrolera o en otro tipo de industria y se aplicar a un caso colombiano.

2. TIPOS DE RESIDUOS GENERADOS HABITUALMENTE EN LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN DE POZOS

2.1. PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS

Es el conjunto de actividades para realizar y mantener la comunicación del yacimiento con la superficie, mediante herramientas diseñadas para la prospección o extracción de hidrocarburos.

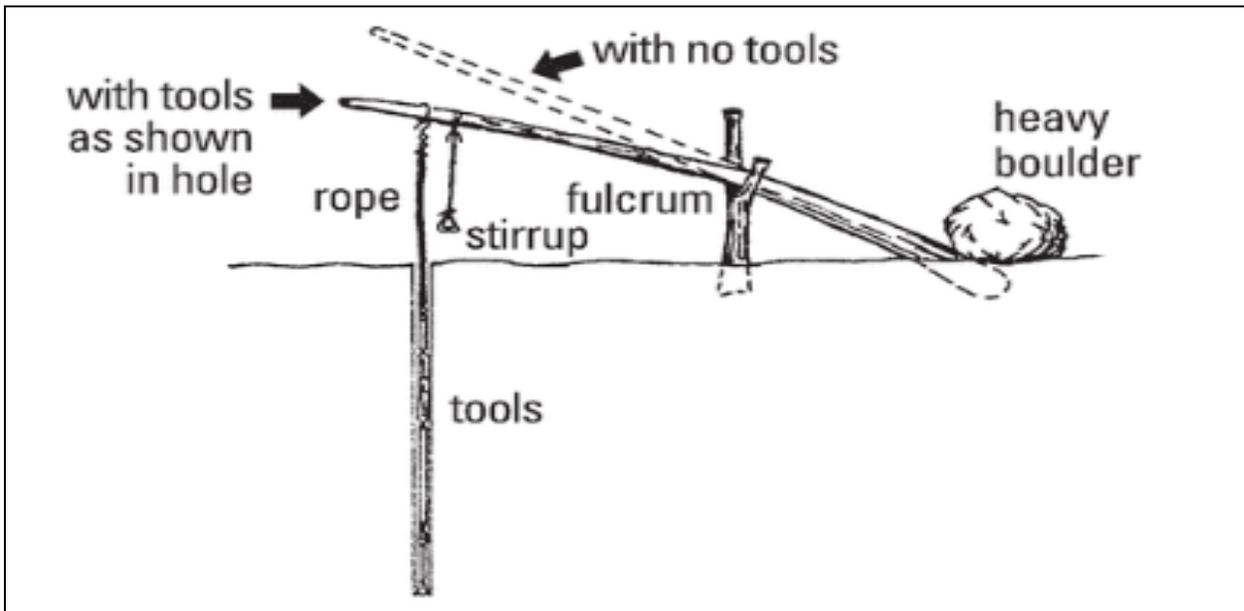
Existen diferentes maneras de hacer un hueco, es decir, de penetrar la tierra para llegar a un recurso de hidrocarburos:

2.1.1. Perforación Spring-Pole

En el año 2000 a. C., los chinos perforaban agujeros en la tierra para recuperar salmuera, lo hacían utilizando brocas de bronce, la mayoría de los agujeros tenían menos de 200 pies de profundidad, sin embargo, hubo un récord de al menos un hoyo perforado a 3,000 pies (Raymond, Martin S. Leffler, William L, 2017).

En los Estados Unidos, las primeras perforaciones de percusión para depósitos de salmuera mezclada con petróleo se registran a principios del siglo XIX. Las excavaciones fueron impulsadas por un hombre pateando un lazo de cuerda o saltando sobre una plataforma con resorte. A través de este movimiento, las varillas de bambú o madera unidas en la parte inferior de una broca de hierro fundido con forma de cincel (la herramienta de corte) se elevaban y dejaban caer sobre la roca sólida. El avance fue lento dependiendo de la dureza de la roca. La perforación de un día podría haber hecho avanzar el pozo un pie. A pesar de eso, este sistema llamado spring-pole el cual se muestra en la **Figura 1**, dominaba la búsqueda de petróleo en América del Norte hasta finales de la década de 1850 (F. Gerali, 2019).

Figura 1. Ensamble de perforación tipo Spring – Pole.

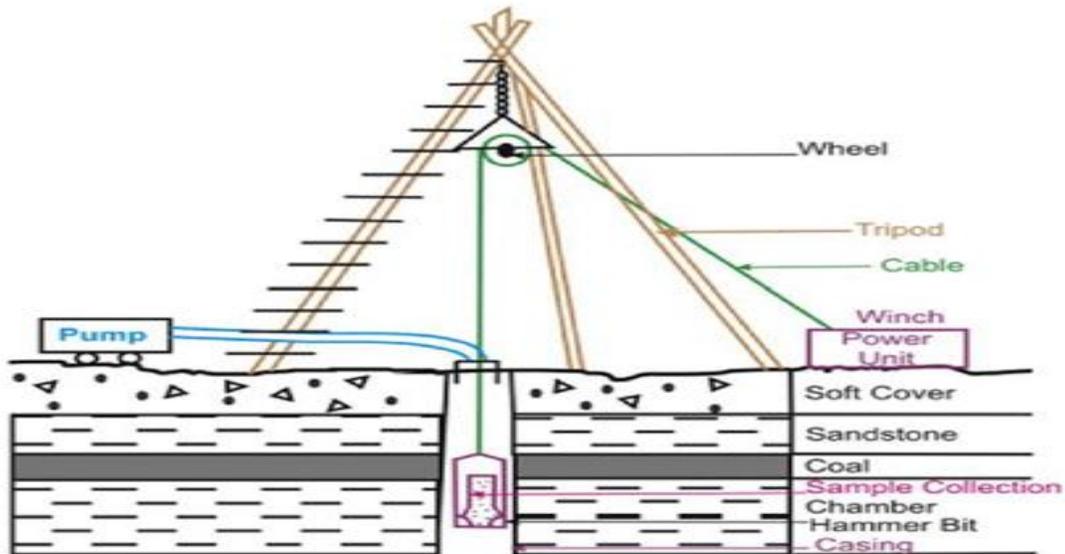


Fuente: Raymond, Martin S. Leffler, William L, 2017.

2.1.2. Percusión o perforación con cable

La perforación por percusión es la técnica de perforación manual que se utilizó en el primer pozo perforado en Norte América. En esta técnica de perforación, se usa una broca para martillar la cual se une a un cable largo, que luego se baja a un agujero abierto de par en par. Como tal, también se denomina perforación con cable, en la que el perforador usa un trípode para sostener las herramientas. La acción de la broca afloja el suelo del pozo, ripios que van saliendo del pozo hacia la superficie a medida que avanza la perforación, como se evidencia en la **Figura 2**.

Figura 2. Diagrama conceptual esquemático del procedimiento de perforación por percusión.



Fuente: Islam, M. Rafiqul Hossain, M. Enamul, 2021.

2.1.3. Perforación rotativa

La perforación rotativa, como se observa en la **Figura 3**, es el método más común de perforación, especialmente para pozos exploratorios y de producción. La profundidad alcanzada por la perforación rotatoria puede llegar a cinco millas bajo tierra.

La perforación rotatoria incluye una mesa rotatoria, que está conectada a un vástago de perforación cuadrado, que luego se conecta a la tubería de perforación y posteriormente a los dispositivos de prevención de reventones. Se sabe que la tubería gira a una velocidad de 40 a 250 rpm con el taladro, usando brocas de arrastre, bordes cortantes afilados o cortadores rodantes con dientes de materiales muy resistentes (Islam, M. Rafiqul Hossain, M. Enamul, 2021).

Figura 3. Mesa rotaria



Fuente: Raymond, Martin S. Leffler, William L., 2017.

2.2. RESIDUOS GENERADOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS

El proceso de perforación de pozos de petróleo y gas genera una variedad de desechos. Algunos de estos desechos son subproductos naturales de la perforación a través de la tierra, por ejemplo, cortes de perforación, y algunos provienen de materiales utilizados para perforar el pozo, por ejemplo, fluido de perforación y aditivos asociados (Razmgir, Seyed Mohsen, Afsari, Meisam , and Mahmud Amani, 2011).

El desafío actual de la industria petrolera es minimizar los residuos y los impactos ambientales en toda la cadena valor, incluidos los desechos generados durante la perforación y su impacto. Las actividades desarrolladas durante la perforación de un pozo, generan una gran cantidad de desechos los cuales se describen a continuación (Islam, M. Rafiqul Hossain, M. Enamul, 2021).

2.2.1. Lodos de Perforación

Un fluido de perforación, o lodo, es un fluido que se utiliza en una operación de perforación, el cual circula o se bombea desde la superficie, baja por la sarta de perforación, atraviesa la broca y regresa a la superficie a través del espacio anular. Estos fluidos, contienen una variedad de aditivos químicos y minerales pesados que circulan a través de la tubería de perforación para realizar una serie de funciones, tales como:

- Suspender y transportar los cortes (sólidos perforados) del fondo del pozo hacia la superficie.
- Controlar la presión de formación y mantener la estabilidad del pozo.
- Sellar formaciones permeables.
- Enfriar, lubricar y apoyar la sarta de perforación.
- Transmitir energía hidráulica a herramientas y brocas.
- Minimizar el daño en la formación productora.
- Permitir una adecuada evaluación de la formación.
- Controlar la corrosión.
- Facilitar la cementación y la terminación del pozo.
- Minimizar el impacto en el medio ambiente.
- Inhibir la formación de hidratos de gas.

La función más crítica que realiza un fluido de perforación es minimizar la concentración de cortes alrededor de la broca y en todo el pozo. Por supuesto, al hacerlo, el propio fluido asume esta carga de cortes, y si los cortes no se eliminan del fluido, pierde rápidamente sus propiedades y por tanto su capacidad para limpiar el orificio y crea tortas de filtración gruesas. Para permitir el reciclaje y la reutilización, en el sitio, del fluido de perforación, los cortes deben eliminarse de manera continua y eficiente (ASME Shale Shaker Committee, 2005).

2.2.1.1. Propiedades de los Fluidos de Perforación

Los fluidos de perforación contienen muchos componentes orgánicos e inorgánicos, cada uno de los cuales realiza una función muy especializada, dentro de las cuales se pueden mencionar los siguientes: (Rizvi, Syed Q. A., 2021).

- Densificante para aumentar la densidad del lodo.
- Agente de control de la viscosidad para aumentar la eficiencia de eliminación de recortes.
- Agente de control de filtración para garantizar el flujo adecuado del fluido.
- Alcalinidad para ajustar el pH del fluido de los lodos a base de agua en el rango de 6 a 13 para controlar la corrosión.
- Productos químicos de eliminación de contaminantes, floculantes, para facilitar la eliminación de sólidos perforados.
- Agente para estabilizar formaciones al minimizar el contacto entre el agua, el lodo y la formación.
- Surfactante para ayudar a emulsionar el aceite y los aditivos orgánicos en agua y agua en aceite y para actuar como agentes espumantes y antiespumantes.
- Aditivo de pérdida de circulación para disminuir la permeabilidad o la fractura de la formación (o ambas) para minimizar las fugas.
- Agente floculantes para flocular sólidos coloidales en el fluido, para una fácil eliminación.
- Lubricante y fluidos de detección para minimizar la resistencia de la sarta de perforación para ingresar al pozo.
- Inhibidor de corrosión para minimizar la corrosión debida al oxígeno o gases ácidos.
- Mejorador de la tasa de perforación para minimizar la reducción de la tasa de perforación, debido a los ripsos o cavings de las formaciones perforadas que pueden adherirse a la barrena.

2.2.1.2. Clasificación de los Fluidos de Perforación

Los fluidos de perforación se pueden clasificar sobre la base de un componente principal. Estos componentes son agua, petróleo y gas. Con frecuencia dos, y a veces tres de estos componentes, se encuentran presentes al mismo tiempo, en donde cada uno contribuye con las propiedades del fluido.

Cuando el constituyente principal es un líquido (agua o aceite), el término lodo se aplica a una suspensión de sólidos en el líquido. Así se caracterizan los lodos de agua y los lodos de aceite. La presencia de ambos líquidos juntos da como resultado una emulsión, siempre y cuando haya agitación y la presencia de un agente emulsionante adecuado. La naturaleza química del agente emulsionante determina si el aceite se emulsiona en el agua (generalmente llamado lodo de emulsión de aceite), o si el agua se emulsiona en el aceite, generalmente llamado emulsión inversa (Gray, George R. Darley, H.C.H., 1980).

Fluidos de perforación base de agua. Estos son el tipo más común de fluidos de perforación, emplean agua dulce, agua de mar o una mezcla de agua y sal común. Los fluidos de perforación base agua salada se utilizan al perforar a través de camas o cúpulas de sal.

Si bien los lodos base agua son más compatibles con el medio ambiente, que los lodos base aceite, carecen de ciertos atributos que están presentes en los lodos base aceite, como lo son: La lubricación, inhibición de lutitas, estabilidad térmica y resistencia a la contaminación química. Sin embargo, algunas de las deficiencias de los sistemas base agua pueden superarse mediante el uso de aditivos (Rizvi, Syed Q. A., 2021).

Fluidos de perforación base de aceite. Los fluidos de perforación base aceite se utilizan para perforar pozos de alto ángulo o de alcance extendido, perforar a través de lutitas reactivas y cuando se requieren altas temperaturas, ya que proporciona mejor

estabilidad del fluido. Estos fluidos son emulsiones de agua en aceite, con salmuera como fase dispersa.

Los fluidos base aceite suelen contener aceite mineral o gasóleo como fase continua. Por lo tanto, el fluido usado y los escombros perforados deben ser tratados previamente a la disposición final, sin embargo, esta desventaja puede superarse reinyectando el corte.

Otras desventajas incluyen el alto costo inicial, las bajas tasas de penetración y las restricciones ambientales relacionadas con su uso y eliminación. Si bien su costo inicial es alto, su costo de ciclo de vida es bajo debido a su posible reutilización (Rizvi, Syed Q. A., 2021).

Fluidos de perforación base aceite sintético. Estos fluidos se desarrollan como alternativas ecológicas a los fluidos de perforación base aceite y son emulsiones agua/aceite con salmuera como fase dispersa. Sin embargo, son formulados con fluidos sintéticos, como ésteres, éteres y polialfaolefinas e isómeros. Desarrollados como sustitutos de fluidos base aceite, su rendimiento es equivalente al de los lodos base aceite sin los peligros ambientales (Rizvi, Syed Q. A., 2021).

2.2.1.3. Tratamiento de los Fluidos de Perforación.

Sabemos que el lodo de perforación es una mezcla de fluidos como agua, petróleo o gas, y sólidos. Los sólidos como arena, limo y piedra caliza no se hidratan ni reaccionan con otros compuestos dentro del lodo y se generan como recortes de la formación durante la perforación. Estos sólidos se denominan inertes y deben eliminarse para permitir que continúe el proceso de perforación de manera eficiente (Islam, M. Rafiqul Hossain, M. Enamul, 2021).

Hay equipos de control de sólidos que se utilizan para eliminar los contaminantes sólidos y el gas atrapado en el lodo, los sólidos se pueden eliminar en cuatro etapas:

Zarandas Vibratorias. La zaranda vibratoria, como se observa en la **Figura 4**, es el dispositivo más común, contiene una o más cribas vibratorias a través de las cuales pasa el lodo. El lodo cargado de sólidos pasa por el vibrador donde la parte líquida del lodo y pequeños sólidos pasan a través de las pantallas del agitador. Luego, los recortes de perforación se recogen en el fondo de la zaranda. Si se usa el tipo correcto de zaranda y se hace funcionar de manera eficiente, las zarandas vibratorias y las cribas de escalpelo pueden eliminar efectivamente hasta el 80 % de todos los sólidos de un fluido de perforación.

Figura 4. Zaranda Vibratoria



Fuente: Zarandas vibratorias de alta calidad y sistemas de fluidos de Perforación [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2022]. Disponible en Internet: <https://es.brightwaysolids.com>.

Separación por Sedimentación. Un método de control de sólidos de bajo costo es permitir que el fluido de perforación se asiente durante algún tiempo. En tal caso, el

lodo contaminado debe circular a través de un pozo de sedimentación. Estos pozos de control de sedimentación funcionan según el principio de desbordamiento. Las partículas por encima del tamaño coloidal eventualmente se asentarán en una condición lenta; sin embargo, cuanto más pequeña sea la partícula, más tiempo tardará en asentarse.

Eliminación de gas. El gas atrapado en el lodo debe eliminarse para mantener la densidad deseada en el nivel necesario para controlar las presiones de formación de fondo de pozo. También hay algunos equipos simples, como una bomba de vacío y un conjunto de flotador. La bomba de vacío crea una presión interna baja que permite que el lodo cortado con gas ingrese al recipiente del desgasificador. Luego se le permite fluir en una capa delgada sobre una placa deflectora interna. La combinación de baja presión interna y una delgada película de líquido hace que las burbujas de gas aumenten de tamaño y suban a la superficie del lodo dentro del recipiente. Como resultado, el gas se descompone del lodo, a medida que el gas se mueve hacia la parte superior del desgasificador, la bomba de vacío lo elimina. El gas extraído se aleja de la plataforma y luego se ventila a la atmósfera o se quema en antorcha. En la **Figura 5** se muestran dos separadores o eliminadores de gas.

Figura 5. Separador de gas



Fuente: Zarandas vibratorias de alta calidad y sistemas de fluidos de Perforación [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2022]. Disponible en Internet: <https://es.brightwaysolids.com>.

Decantación forzada. Los desarenadores son dispositivos que se denominan hidrociclones, funcionan según el principio de separar los sólidos de un líquido creando fuerzas centrífugas dentro del hidrociclón. El lodo se inyecta tangencialmente en el hidrociclón y las fuerzas centrífugas resultantes impulsan los sólidos hacia las paredes del hidrociclón. Finalmente, el hidrociclón descarga los sólidos del vértice con un pequeño volumen de lodo. La porción fluida del lodo sale de la parte superior del hidrociclón como un desbordamiento y luego se bombeado nuevamente hacia el fondo del pozo. Los hidrociclones vienen en varios tamaños y formas y, por lo general, se especifican por el tamaño de las partículas que están diseñados para eliminar. En general, hay cuatro tipos de hidrociclones: Desarenadores, limpiadores de lodo y centrífugas los cuales se presentan en la **Figura 6**.

Figura 6. Centrífugas y desarenadores

Fuente: Zarandas vibratorias de alta calidad y sistemas de fluidos de Perforación [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2022]. Disponible en Internet: <https://es.brightwaysolids.com>.

2.2.2. Cortes de Perforación

Son trozos pequeños de roca que se fracturan, a medida que la perforación avanza, debido a la acción de los dientes de la broca. Los cortes se criban, en superficie, a partir del sistema de lodo líquido en las zarandas vibratorias y son monitoreados en cuanto a composición, tamaño, forma, color, textura, contenido de hidrocarburos y otras propiedades por el ingeniero especialista en registros de lodo, el registrador de lodo y el personal en sitio. El registrador de lodo generalmente captura las muestras de cortes para el proceso subsiguiente de análisis y archivado (The Schlumberger Energy Glossary).

La litología y el espesor aproximado de los estratos que se penetran durante la perforación se pueden monitorear, describiendo los cortes después de que se separan de los retornos de fluido del pozo. Es necesaria una descripción precisa de los cortes con el fin de determinar la profundidad y el tipo de estratos de toda la columna estratigráfica perforada. Las descripciones precisas de los cortes de perforación son especialmente importantes, si no se toman núcleos, y críticas si no se corren registros de pozo. Los cortes deben ser recolectados a profundidades regulares para evitar tiempos de retraso cuando las tasas de perforación varían (Luppens, James A. Wilson, Stephen E. Stanton, Ronald W., 1992)

La generación de los cortes de perforación depende de varios aspectos, entre los más importantes se tiene el tipo del fluido de perforación ya sea base agua o base aceite, la profundidad del pozo, el tipo de formación geológica y las ROP's con que la broca perfora, los cuales son explicados a continuación: (Espinoza Andrés, Quiroga Karen, 2013)

- **Tipo de fluido de perforación:** fluidos base agua en presencia de arcillas reactivas, provocan que los cortes de perforación salgan con un mayor tamaño (cavings), los fluidos de perforación base aceite en contacto con la formación, no altera sus propiedades logrando cortes de perforación de menores tamaños.
- **Profundidad del pozo:** pozos a mayor profundidad tendrán cortes de perforación con un menor tamaño, en la sección más profunda y pozos someros tendrán cortes de perforación con un diámetro mayor (cavings), en la sección más profunda.
- **Formación geológica:** Formaciones consolidadas tendrán un tamaño de corte menor y formaciones poco consolidadas tendrán un tamaño de corte mayor (cavings).
- **ROP's de perforación:** Con altas ROP's los cortes saldrán de un mayor tamaño (cavings), y bajos ROP's los cortes saldrán de un menor tamaño.

Los contaminantes presentes en los recortes de perforación dependen tanto de la naturaleza del lodo de perforación como de la composición de la formación, los contaminantes incluyen hidrocarburos y metales pesados. Los lodos de perforación base aceite son menos compatibles con el medio ambiente que los lodos de perforación sintéticos. Sin embargo, las propiedades de biodegradación de la perforación sintética son bastante similares a los de la perforación base aceite (Fink, Johannes, 2021).

2.2.2.1. Técnicas de Tratamiento de cortes de perforación

Las técnicas de tratamiento se diferencian de las técnicas de eliminación, en que modifican o separan las propiedades de los desechos, sin embargo, los desechos deben colocarse en algún lugar; ya sean enterrados, descargados, en el suelo o inyectados. Las técnicas de tratamiento tienen como objetivo eliminar el petróleo, reducir la movilidad de los contaminantes o modificar de otro modo las propiedades de los residuos (ASME Shale Shaker Committee, 2005).

Se han probado diversas técnicas de tratamiento de cortes de perforación, principalmente con dos objetivos, el primero, reducir la cantidad de aceite retenido en los cortes, para permitir que los cortes se puedan disponer. El segundo, encapsular los cortes y los contaminantes para evitar su lixiviación al medio ambiente. Algunas de las técnicas se describirán a continuación:

Deshidratación. La deshidratación es el paso final del sistema; mientras que las centrifugas de alta velocidad eliminan partículas de 2 a 3 micrones o incluso más grandes, la deshidratación puede eliminar todas las partículas coloidales hasta obtener agua clara (ASME Shale Shaker Committee, 2005).

La deshidratación de fluidos a base de agua no se ve afectada por la presencia de aceite o lubricantes, ya que estos se separan con la fase líquida y por diferencia de densidades tienden a flotar sobre el agua. Todos los fluidos a base de agua se pueden deshidratar, aunque algunos tienden a ser más fáciles que otros. Por el contrario, la deshidratación de fluidos base aceite no es tan fácil y requieren un tratamiento previo con un agente químico que permita romper la emulsión aceite-agua. Sin embargo, hoy en día, incluso los fluidos contaminados con cemento se pueden deshidratar para reducir los costos de eliminación al requerir que solo se eliminen los sólidos.

El uso de unidades de deshidratación durante las operaciones de perforación se ha vuelto obligatorio en algunas partes del mundo, como el Ártico, las selvas y las selvas tropicales y en las proximidades de los entornos urbanos. Además, las unidades de drenaje pueden ser obligatorias cuando se perfora cerca de fuentes de agua dulce, cerca de áreas de pesca sensibles o donde la preocupación por proteger las especies del océano es muy fuerte o está regulada.

Pretratamiento Químico. Con el pH del fluido entre 7,0 y 10,0, las partículas coloidales en el fluido tienden a tener carga negativa, las cuales repelen las partículas, evitando que se agrupen para formar partículas más grandes. Es difícil eliminar estos coloides,

incluso con una centrífuga de alta velocidad. Por lo tanto, para eliminar estas diminutas partículas en el fluido, primero es necesario tratar el fluido con productos químicos, con el fin de aglomerar los sólidos y hacerlos lo suficientemente grandes como para ser eliminados, por una centrífuga de alta velocidad.

El proceso de aglomeración para crear partículas grandes y densas requiere de tres pasos:

- a. Desestabilizar las partículas para que ya no se repelan entre sí. Esto se logra fácilmente bajando el pH de 7,0—10,0 a aproximadamente 5,5.
- b. Coagular los sólidos finos para crear una atracción entre las partículas.
- c. Flocular para crear racimos grandes y densos.

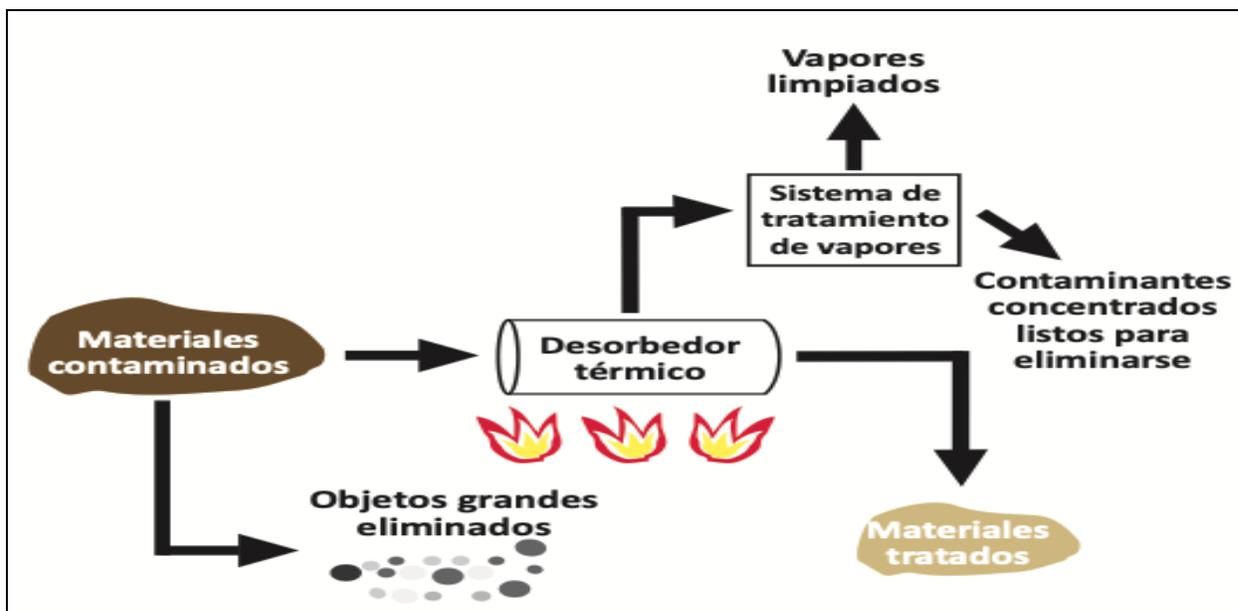
Para maximizar la eficiencia y eficacia de la deshidratación, se debe asignar suficiente tiempo entre la adición de cada uno de los tres productos químicos. Esto permite que los productos químicos reaccionen por completo con las partículas y garantiza que el tratamiento químico afecte principalmente a los sólidos, con cantidades insignificantes de químicos en la fase líquida.

Desorción Térmica. La desorción térmica mostrada en la **Figura 7**, describe una técnica de tratamiento en la que los cortes aceitosos son sometidos a altas temperaturas eliminando los líquidos volátiles, lo que da como resultado dos fases. La fase líquida que contiene agua y aceite se separa, al componente sólido generalmente se le remueve alrededor del 0,5 % de aceite en peso. La salinidad permanece con los sólidos, al igual que el contenido de metales pesados (bario, zinc, plomo, entre otros). Es importante entender que esta técnica solo funciona para cortes de perforación base aceite.

En la desorción térmica, los cortes aceitosos se alimentan a una unidad de calentamiento. Existen muchos tipos de unidades de calentamiento, pero el propósito

es transferir calor de manera eficiente a los cortes de perforación con el fin de expulsar el aceite y el agua. Dependiendo de la calidad, el aceite recuperado se usa para alimentar el proceso, como fluido de reposición para el sistema de fluidos o puede venderse a industrias que necesitan combustible para calderas.

Figura 7. Proceso de desorción térmica



Fuente: Guía comunitaria sobre la desorción térmica [Anónimo]. Welcome to Sems Publishing [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2022]. Disponible en Internet: <<https://semspub.epa.gov/work/HQ/401624.pdf>>.

Ventajas

La principal ventaja de la desorción térmica es que elimina casi todo el aceite de los sólidos. Si los criterios de disposición exigen un contenido de hidrocarburos extremadamente bajo, la única forma de obtenerlo es por medio de la desorción térmica. Una segunda ventaja es la recuperación de aceite que teóricamente se puede reutilizar. Sin embargo, esto depende del proceso, el control de la temperatura y la capacidad de controlar el oxígeno.

Desventajas

Las principales desventajas hacen referencia a los costos y la seguridad. La industria ha abordado las preocupaciones de seguridad. Otras desventajas incluyen:

- a. Los sólidos procesados aún deben manipularse y disponerse.
- b. La calidad del aceite recuperado varía según el proceso.
- c. Hay altos costos de capital.
- d. El mantenimiento es relativamente alto.
- e. La técnica depende en gran medida de la experiencia y pericia del operador.
- f. Las emisiones al aire deben ser controladas y monitoreadas.

Solidificación/Estabilización. La solidificación es una técnica en la que se agrega material para reducir el agua libre y posiblemente reducir o retrasar la posible liberación de contaminantes. En el pasado, esta técnica se usaba antes del entierro o esparcimiento por carretera del material solidificado. También se ha utilizado para fabricar material reutilizable, como ladrillos o bloques. Probablemente, la aplicación más prometedora ha sido la fabricación de material que se usa debajo de la superficie de las carreteras.

En cualquier proceso de solidificación, el material solidificado debe pasar primero por algún tipo de prueba de lixiviado. Como control del proceso, la cantidad de material de solidificación agregado a los cortes siempre debe ser equivalente a la cantidad requerida para pasar la prueba de lixiviado. El segundo resultado que se debe obtener es que el material solidificado debe parecerse a cualquier material que se esté haciendo, esto quiere decir que, si el producto deseado es un ladrillo, entonces se debe hacer un buen ladrillo, si el producto deseado es material apto para uso en carretera, entonces el material debe pasar las pruebas de buen material apto para uso en carretera.

Desventajas

Si bien las ventajas parecen obvias, hay algunas desventajas:

- a. Aplicación deficiente o descontrolada de la tecnología.
- b. Lixiviación de contaminantes.
- c. Incrementos en el volumen de residuos.
- d. Mano de obra intensiva.
- e. Responsabilidad a largo plazo con el producto.
- f. El principal inconveniente: la promesa incumplida de que la tecnología.

2.2.3. Agua de Sentina y de Lastre

En las operaciones en alta mar, una gran cantidad de agua de mar puede filtrarse o fluir hacia la estructura a través de varios puntos durante los largos períodos de operación. Esta agua se conoce como sentina, mientras que el agua de lastre es el agua utilizada para mantener la estabilidad de una instalación en alta mar. Las aguas de sentina y de lastre contienen altas concentraciones de hidrocarburo (Khan, M.I. Islam, M.R., 2007).

2.2.4. Drenaje de Cubierta

Hace referencia al agua que llega a la cubierta de una plataforma petrolera a través de la precipitación, la acción de las olas y el rocío del mar, o de operaciones de rutina como el lavado y los simulacros de incendio (Khan, M.I. Islam, M.R., 2007).

2.2.5. Otros Residuos

Hay muchos otros desechos que se pueden generar incluidos los lodos de los sistemas de separación de agua y aceite, el agua de prueba hidrostática, los fluidos de terminación, el mono etilenglicol, los lubricantes usados y los materiales plásticos, junto con los suministros en exceso o dañados. Dependiendo del material, estos desechos pueden reutilizarse, reciclarse o disponerse (Khan, M.I. Islam, M.R., 2007).

3. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ACTUAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE CORTES DE PERFORACIÓN EN COLOMBIA EN COMPARAR CON LA INTERNACIONAL.

En este capítulo se hace una descripción general de la normatividad colombiana y de países como Indonesia, Arabia Saudita, Estados Unidos y Canadá, relacionada con la disposición final de cortes de perforación y al final se hace una comparación entre ellas. Para esto, es importante mencionar que, el desarrollo de controles y límites específicos para la gestión de residuos a nivel mundial se ha visto influenciado por los siguientes aspectos (Clements, Kayli, Veil, John A., Arthur J. Leuterman, 2010):

- **La historia de la actividad en un área.** Esto influye en el tiempo que han estado evolucionando los procesos normativos en relación con técnicas específicas de gestión de residuos.
- **El nivel de actividad en un área.** Aquellos lugares con niveles muy significativos de actividad de perforación pueden tener los recursos y las necesidades para desarrollar e implementar más controles regulatorios.
- **La influencia de otras actividades industriales, mineras y comerciales en la zona.** Con frecuencia, los controles regulatorios tienen una influencia significativa de otras actividades comerciales e industriales en el área.
- **Cambios en las estructuras gubernamentales y adherencia a varias prioridades regulatorias.** Los gobiernos recién formados o los cambios en el liderazgo pueden cambiar el enfoque hacia un mayor desarrollo de las operaciones de E&P o un mayor desarrollo de los controles ambientales.

- **Experiencia histórica con diversas técnicas de gestión de residuos.** El tratamiento de residuos ha ido evolucionando a través de la historia, a medida que se avanza técnicamente en esta temática.
- **Evolución de los controles regulatorios en función de factores geográficos y regionales.** Por ejemplo, países con climas más fríos tienen menos probabilidades de adoptar la biorremediación que los países con climas más cálidos, debido a la viabilidad de la tecnología en esa área específica.

A continuación, se presenta la normativa actual de disposición final de cortes de perforación en Colombia y las más relevantes a nivel mundial.

3.1. NORMATIVA COLOMBIANA

Se relaciona la normativa legal colombiana que debe ser considerada para los procesos de disposición final de cortes de perforación.

3.1.1. Decreto 838 de 2005

El cual es una modificación el Decreto 1713 de 2002, tiene por objeto promover y facilitar la planificación, construcción y operación de sistemas de disposición final de residuos sólidos, provee los criterios y metodologías que deben tener los residuos para la disposición final en landfills, en este caso los lineamientos generales para cortes de perforación. Igualmente, reglamenta el procedimiento a seguir por parte de las entidades territoriales para la definición de las áreas potenciales susceptibles para la ubicación de landfills (Decreto 838 de 2005).

Para la localización de áreas potenciales las entidades territoriales consideran la totalidad del área bajo su jurisdicción, los criterios y la metodología para la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos (Decreto 838 de 2005).

- a. Capacidad.** El área donde se ubica el relleno sanitario debe ser suficiente para permitir que la vida útil de este sea compatible con la producción proyectada de residuos sólidos a disponer en el mismo, considerando tanto el municipio receptor como aquellos ubicados dentro de un radio de 60 kilómetros del mismo. Por lo tanto, este criterio se califica en función de la cantidad de residuos sólidos que se puedan disponer dando 0 puntos para una capacidad igual o menor a 0.5 veces la producción de residuos producidos en treinta (30) años, hasta 200 puntos para una capacidad igual o mayor a 1.5 veces la producción de residuos sólidos producidos en treinta años (30) años, calificándose en forma lineal a partir de 0.5 veces la producción de residuos producidos en los treinta (30) años.
- b. Ocupación actual del área.** Se deben determina las actividades que actualmente se van realizando con el objeto de prever posibles impactos sobre la comunidad o los recursos naturales de acuerdo al puntaje relacionado en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Ocupación del área

Ubicación	Puntaje
Suelo Rural	80
Suelo Subrural	40
Suelo Urbano	20
Otros suelos de protección	0

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- c. Accesibilidad vial.** Este criterio corresponde a la facilidad y economía que la persona prestadora del servicio de recolección y transporte tiene para llevar los residuos sólidos al área de disposición final. El criterio se divide en los subcriterios relacionados en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Accesibilidad vial

Condiciones de la vía principal	
Pavimentada	20 puntos
Sin pavimentar	8 puntos
Pendiente promedio de la vía principal	
0-3 %	20 puntos
3,1 – 5%	12 puntos
5,1 – 7%	8 puntos
7,1 y mayores	0 puntos
Distancia de la vía de acceso	
0 a 5 km	20 puntos
5,1 a 10 km	12 puntos
10,1 a 15 km	4 puntos
Mayores de 15 km	0 puntos
Pendiente promedio de la vía de acceso	
0-3 %	20 puntos
3,1 – 5%	12 puntos
5,1 – 7%	8 puntos
7,1 y mayores	0 puntos
Numero de vías de acceso	
2 o más vías	20 puntos
Una vía	8 puntos
No hay vías	0 puntos
Condiciones de la vía de acceso	
Pavimentada	20 puntos
Afirmado	12 puntos
Carreteable	8 puntos
Tocha/ No existe	0 puntos

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- d. **Condiciones del suelo y topografía.** Este criterio determina las facilidades de construcción, operación y trabajabilidad en el área en que se efectúa la disposición final, calificadas bajo los subcriterios presentes en el **Cuadro 3.**

Cuadro 3. Condiciones del suelo y topografía

Pendiente promedio del terreno	
0,1%-3%	40 puntos
0,101	30 puntos
0,191	20 puntos
0,371	10 puntos
Mayor de 25%	0 puntos
Facilidad para el movimiento de tierras del área en que se efectuará dicha disposición final, mediante la tecnología de relleno sanitario	
Muy fácil	40 puntos
Fácil	32 puntos
Regular	20 puntos
Difícil	12 puntos
Imposible	12 puntos

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- e. **Disponibilidad de material de cobertura.** Este criterio se asocia a los costos de transporte en que incurre la persona prestadora del servicio para obtener y llevar el material de cobertura necesario para dar cumplimiento a las especificaciones técnicas y ambientales en los procesos de operación diaria y clausura del landfill, el cual se califica según los subcriterios presentes en el **Cuadro 4.**

Cuadro 4. Disponibilidad de material de cobertura

Distancia del sitio de obtención de material de cobertura hasta el área de disposición final	
0 km a 2 km	60 puntos
2,1 km a 4 km	40 puntos
4,1 km a 6 km	20 puntos
6,1 km a 10 km	10 puntos
Mayor de 10 km	0 puntos
Calidad del material de cobertura medida por su textura	
Recebo granular	40 puntos
Arcilla arenosa	32 puntos
Limo arenoso	20 puntos
Arcilla	16 puntos
Limo arcilla	8 puntos
Limos	0 puntos

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- f. **Densidad poblacional en el área.** Este criterio determina la posible afectación de la población "ubicada en el área de influencia directa del área en la que se efectuará la disposición de residuos sólidos, según los subcriterios relacionados en el **Cuadro 5.**

Cuadro 5. Densidad poblacional

Densidad	Puntos
0 habitantes/ ha a 2 habitantes/ha	40
2,1 habitantes/ha a 5 habitantes/ha	20
Mayor a 5 habitantes/ ha	0

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- g. Incidencia en la congestión de tráfico en la vía principal.** Este criterio determina la incidencia que puede tener sobre el tráfico de la vía principal, el desplazamiento de los vehículos que transportan el residuo hasta el área donde se realiza la disposición final, cuantificados según los subcriterios presentes en el **Cuadro 6**.

Cuadro 6. Incidencia en la congestión del tráfico

Congestión de tráfico	Puntos
Ninguna	40
Moderada	20
Grande	0

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- h. Distancias a cuerpos hídricos.** Este criterio establece la relación que tiene el área en la que se efectúa la disposición final de residuos, respecto a las fuentes hídricas permanentes y superficiales existentes en la zona, cuantificándose según los subcriterios presentes en el **Cuadro 7**.

Cuadro 7. Distancia a cuerpos hídricos

Metros	Puntos
Mayor de 2.000	60
1.000 a 2.0000	40
500 a 999	20
50 a 499	10
Menos de 50	0

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- i. Dirección de los vientos.** Este criterio determina la incidencia que puede tener la dirección de los vientos con respecto al casco urbano, en la operación de la

infraestructura instalada en el área en que se efectuará la disposición final de residuos, según los subcriterios relacionados en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Dirección del viento

Dirección	Puntos
Dirección en sentido contrario al casco urbano más cercano	40
Dirección en sentido del casco urbano más cercano	0

Fuente: Decreto 838 de 2005.

- j. **Geoformas del área respecto al entorno.** Este criterio hace referencia a la incidencia que puede tener sobre el paisaje y el entorno, calificándose respecto a la zona urbana, la operación de la infraestructura ubicada en el área en que se efectuará la disposición final de residuos, según los subcriterios presentes en el **Cuadro 9**.

Cuadro 9. Geoformas de las áreas

Geoformas	Puntos
Zona quebrada y encajonada	40
Zona en media ladera parcialmente encajonada	32
Zona en media ladera abierta	20
Zona plana y abierta	12

Fuente: Decreto 838 de 2005.

El puntaje máximo de la evaluación será de 1.000 puntos. El puntaje obtenido por cada área potencial no indica el descarte o rechazo de alguna de las mismas, sino que indica una posición dentro de un orden de elegibilidad, de mayor a menor, de acuerdo con el valor del puntaje obtenido (Decreto 4741 del 2005).

3.1.2. Decreto 4741 del 2005

Por el cual se reglamenta la prevención y el manejo de los residuos peligrosos generados en el marco legal de la gestión integral de residuos (Decreto 4741 del 2005).

El presente decreto tiene por objeto prevenir la generación de residuos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos generados, con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente, las disposiciones del presente decreto se aplican en el territorio nacional a las personas que generen, gestionen o manejen residuos peligrosos (Decreto 4741 del 2005).

Además, considera residuo tóxico aquel que, al realizarle una prueba de lixiviación para característica de toxicidad, contiene uno o más de las sustancias, elementos o compuestos en concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles de lixiviados establecidos en **Cuadro 10** (Decreto 4741 del 2005).

Cuadro 10. Concentraciones máximas de contaminantes para prueba TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure).

Contaminante	Nivel Máximo (mg/l)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Benceno	0.5
Cadmio	1.0
Tetraclorurodecarbono	0.5
Clordano	0.03
Clorobenceno	100.0
Cloroformo	6.0
Cromo	5.0

o-Cresol	200.0
m-Cresol	200.0
p-Cresol	200.0
Cresol	200.0
2,4-D	10.0
1,4-Diclorobenceno	7.5
1,2-Dicloroetano	0.5
1,1-Dicloroetileno	0.7
2,4-Dinitrotolueno	"0.13
Endrín	0.02
Heptacloro	0.008
Hexaclorobenceno	0.13
Hexaclorobuádieno	0.5
Hexacloroetano	3.0
Plomo	5.0
Lindano	0.4
Mercurio	0.2
Metoxiclor	10.0
Metil etil cetona	200.0
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	100.0
Piridina	5.0
Selenio	1.0
Plata	5.0
Tetracloroetileno	0.7
Toxafeno	0.5
Tricloroetileno	0.5
2,4,5-Triclorofenol	400.0
2,4,6-Triclorofenol	2.0

2,4,5-TP (silvex)	1.0
Cloruro de vinilo	0.2

Fuente: Decreto 4741 del 2005.

3.1.3. Resolución 18 1495 de 2009

En esta resolución se establecen medidas en materia de exploración y explotación de hidrocarburos, tiene por objeto regular y controlar las actividades relativas a la exploración y explotación de hidrocarburos con el fin de maximizar su recuperación final (Resolución 18 1495 de 2009).

En las operaciones reglamentadas en esta resolución se deben aplicar los estándares y normas técnicas nacionales e internacionales y especialmente las recomendadas por el AGA, API, ASTM, NFPA, NTC-Icontec, Norma Retie o cualquiera otra que las modifique, utilizadas en la industria petrolera (Resolución 18 1495 de 2009).

3.1.4. Guía de manejo ambiental para proyectos de perforación de pozos de petróleo y gas.

Esta guía establece criterios para la gestión ambiental de los residuos sólidos propios de la actividad de perforación en sus diferentes etapas de desarrollo y tiene como objetivo (Ministerio del Medio Ambiente, 1999):

- Proporcionar a las empresas interesadas en el sector y a las autoridades ambientales una herramienta de consulta que contenga los criterios, lineamientos y orientaciones de carácter general sobre la concepción, planificación, construcción, operación y mantenimiento, haciendo énfasis en el manejo ambiental de estas actividades.
- Unificar criterios para el manejo ambiental de residuos sólidos, como cortes de perforación.

- Establecer criterios para la gestión ambiental de los residuos líquidos y sólidos provenientes de la operación del taladro y los lodos con alta concentración de agua o contaminantes como el aceite.

También, propone los siguientes elementos básicos de gestión para el desarrollo de proyectos de perforación de pozos:

- Planificar las actividades del proyecto.
- Establecer criterios y lineamientos de manejo, a través de alternativas, donde cada proyecto selecciona la opción más adecuada.
- Proponer mecanismos de verificación y control de las actividades propuestas.
- Propiciar la comunicación al interior de la organización responsable y a nivel externo, con las comunidades y las autoridades ambientales y gubernamentales.

La disposición residuos sólidos y especiales debe satisfacer los siguientes objetivos de calidad:

- El método o técnica de disposición debe estar acorde con las características del residuo.
- La disposición debe planearse teniendo en cuenta los efectos ambientales del método o técnica adoptada.

Las técnicas de uso más frecuente para residuos sólidos en la industria petrolera nacional se muestran en el **Cuadro 11**. Estas constituyen solamente alternativas que deben ser analizadas para cada caso en particular, a la luz de la conveniencia para el ambiente y para el proyecto (Ministerio del Medio Ambiente, 1999).

Cuadro 11. Alternativas para disposición de residuos sólidos

Residuos a disponer	Alternativas				
	Landfill	Incineración	Biodegradación	Escombrera	Relleno seguro
Residuos peligrosos		x			x
Lodos aceitosos		x	x		x

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 1999.

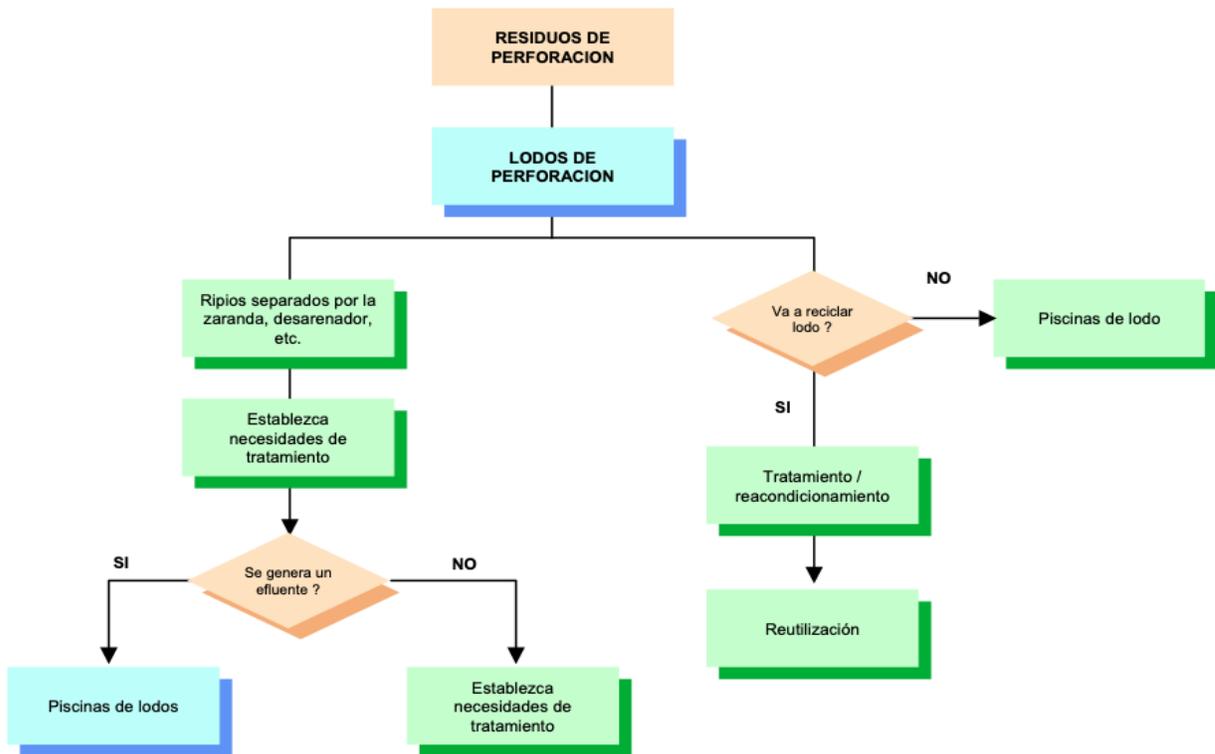
Los impactos a prevenir y mitigar según esta guía son:

- Contaminación del suelo.
- Deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, causada por vertimiento de residuos líquidos y la disposición de los residuos sólidos de la perforación.
- Daño a los recursos naturales asociados al suelo, como consecuencia de los factores de deterioro mencionados.
- Uso ineficiente de recursos naturales, que lleve a su agotamiento.
- Deterioro de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, causada por la disposición de los residuos sólidos.

3.1.4.1 Criterios de manejo.

En la **Figura 8** se observan Los criterios con los cuales se define el manejo ambiental de cortes y lodos de perforación.

Figura 8. Manejo ambiental de residuos de perforación.



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 1999.

Criterios para el manejo de cortes:

- Inyección por el anular, una vez terminados los trabajos de perforación
- Inyección en pozos no productores o abandonados
- Como relleno de las piscinas de lodos
- Solidificación
- Biodegradación

En el evento de contar con una o más opciones de igual importancia ambiental, se escogerá la más favorable. Si el pozo es declarado productor, la inyección por el anular puede no ser una alternativa.

Opciones de manejo de lodos:

- Máxima reutilización del material en la perforación
- Descarga sobre piscinas cuando no sea posible la reutilización
- Tratamiento.

Manejo de lodos y cortes de perforación. Esta guía sugiere el manejo ambiental de los residuos de lodos comúnmente utilizados y relaciona los tratamientos recomendados en función de la sensibilidad ambiental del área. Adicionalmente se hace referencia a los siguientes casos particulares:

Las pautas sugeridas para el manejo son:

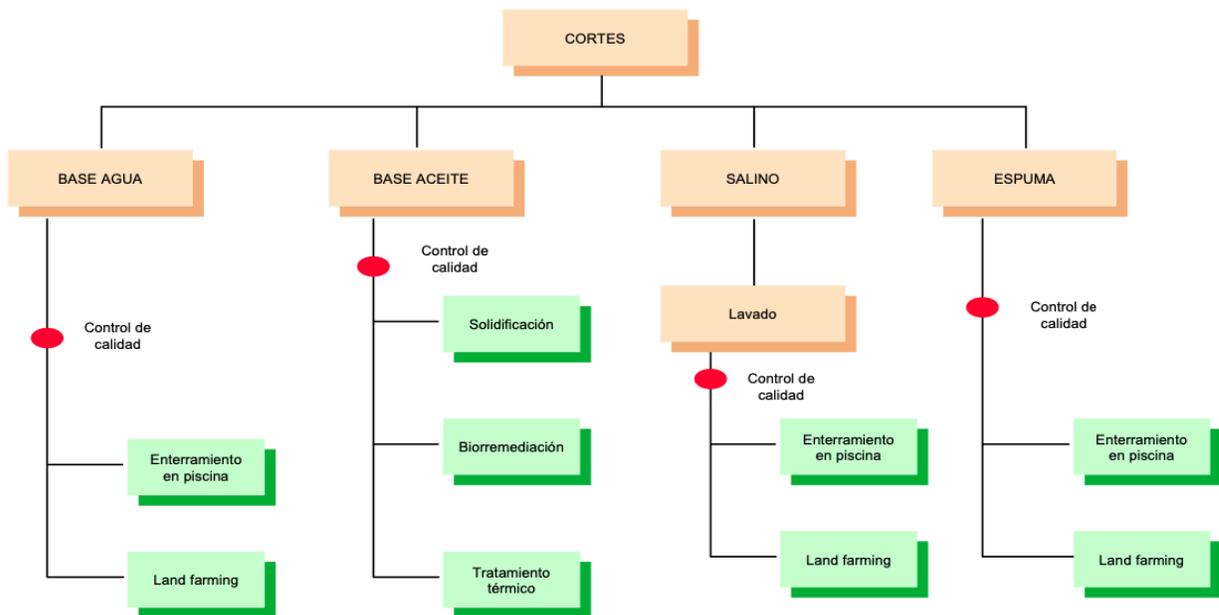
- En lo posible se buscarán sustitutos que produzcan resultados similares con una relación beneficio/costo aceptable para el operador.
- No se deben depositar en el medio
- El sistema de manejo será en circuito cerrado
- Cuando el programa de lodos implique el uso de otro tipo de formulación (P.e. lodo base agua), se proveerán las facilidades necesarias para el manejo segregado de los residuos aceitosos
- La disposición de cortes contaminados deberá considerar la posibilidad de que el aceite afecte recursos como el suelo o el agua. Técnicas como la solidificación, el encapsulamiento o la biodegradación son aceptables si se ejecutan dentro de los parámetros técnicos recomendados.

Perforación con espumas. El manejo de los residuos generados cuando se utiliza esta técnica de perforación normalmente requiere de dos piscinas, la primera para recibir los fluidos de perforación y la segunda para el tratamiento del residuo.

3.1.4.2. Disposición final de cortes.

Las opciones recomendadas para disponer los cortes de perforación se encuentran indicadas en la **Figura 9**. Su aplicabilidad depende fundamentalmente del tipo de lodo utilizado (que determina en parte los contaminantes presentes en los cortes) y de las características del área de trabajo. En cualquier caso, es necesario que la solución escogida sea adecuada para proteger el suelo y las aguas superficiales y subterráneas.

Figura 9. Opciones para la disposición de cortes de perforación.



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 1999.

3.2. NORMATIVA INTERNACIONAL

A nivel mundial, las preocupaciones comunes sobre el daño ambiental de los fluidos y corte de perforación continúan impulsando la investigación, la tecnología y las regulaciones con los objetivos de una posible reutilización beneficiosa y reducción de la huella de carbono en las operaciones de la industria del petróleo y gas (Clements, Kayli, Veil, John A., and Arthur J. Leuterman, 2010).

A continuación, se relaciona la normativa que debe ser considerada en algunos países y estados para la disposición final de cortes de perforación de la industria petrolera. Para desarrollar esta temática se tomó como ejemplo a Indonesia, Arabia Saudita, Estados Unidos y Canadá países que han desarrollado buenas prácticas y estrategias para el manejo de residuos de perforación y de protección del medio ambiente, las cuales pueden tomarse como referencia para analizar el tratamiento de estos residuos, en nuestro país.

3.2.1. Indonesia

En Indonesia, los residuos producidos durante las actividades de perforación de la industria del petróleo y gas se clasifican como peligrosos y tóxicos en relación con el reglamento Gubernamental No. 18 de 1999 sobre la gestión de residuos tóxicos y peligrosos (Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledog, 2000).

En 1995, el Gobierno de la República de Indonesia emitió un reglamento denominado PP 19/1995 sobre la gestión de residuos peligrosos y tóxicos. Esta norma considera como peligrosos y tóxicos los residuos constituidos por los fluidos y cortes de perforación. Para cumplir con esta regulación todas las actividades de perforación deben tratar sus residuos antes de su disposición final, aunque los residuos no sean peligrosos ni tóxicos, cumpliendo con los parámetros TCLP relacionados en el **Cuadro12** (Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledog, 2000).

Cuadro 12. Parámetros TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure)

No.	Elemento Químico	Símbolo	Estándar(mg/L)
1	Arsénico	As	5.0
2	Bario	Ba	100.0
3	Boro	Bo	500.0

4	Cadmio	Cd	1.0
5	Cromo	Cr	50.0
6	Cobre	Cu	10.0
7	Plomo	Pb	5.0
8	Mercurio	Hg	0.2
9	Selenio	Se	1.0
10	Plata	Ag	5.0
11	Zinc	Zn	50.0

Fuente: Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledoeg, 2000.

En 1998, el Gobierno estableció un equipo para preparar y proponer una modificación al Reglamento existente, el PP 19/1995. Fue en 1999 año en el cual Gobierno emitió el nuevo reglamento denominado PP 18/1999, que reemplazó al PP 19/1995. Este reglamento propone realizar una prueba antes de la disposición final con el fin de determinar si el residuo es peligroso y tóxico (Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledoeg, 2000).

En octubre de 1999, el gobierno emitió el Reglamento PP 85/1999, que reemplazó la Norma para cumplir los parámetros TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure), la cual fue muy similar a la EPA de EE.UU. Este estándar es más razonable y alcanzable para lograr una adecuada gestión residuos, además, de ser complemento del Reglamento PP 18/1999 (Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledoeg, 2000).

Manejo de lodos y cortes de perforación base agua. Se debe asegurar en primer lugar que el lodo base agua utilizado durante la perforación no sea tóxico, para esto se debe realizar la prueba 96hrLC₅₀ y cumplir con lo siguiente:

- Si el resultado es mayor o igual a 30.000 ppm, el corte base agua se puede verter directamente en las piscinas o fosas para operaciones onshore o directamente al mar para operaciones offshore.

- Si el resultado es menor a 30,000 ppm, el lodo debe ser tratado antes de su disposición final.
- Debe cumplir con los parámetros permisibles de TCL relacionados en el **Cuadro 12.**

La separación de los residuos sólidos y líquidos se realiza en fosas o piscinas destinadas para el almacenamiento de corte y lodo. Los sólidos por su peso se asientan en el fondo mientras que el líquido se transporta a otros pozos. El sólido sedimentado se extrae periódicamente y se dispone en el área landfill designada, después de la prueba TCLP. Si el resultado de la prueba aún supera el estándar, los sólidos deben ser tratados hasta cumplir con los parámetros establecidos para poder disponerlos finalmente en el área designada. Si el residuo tiene presencia de aceite este se separa por gravedad y fluye a través de skimmers para su recuperación (Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledoeg, 2000).

Los residuos líquidos se recogen en un tanque y se bombean a través de una centrífuga, luego se inyecta polímero para separar los sólidos en suspensión. Cuando el líquido es claro y cumple con la norma de calidad de aguas residuales (KepMen LH 42/1996), se puede disponer en cuerpos de agua. Los residuos sólidos que contengan metales pesados, que excedan el estándar, deben solidificarse antes de su disposición final en el área landfill.

Pruebas. Las pruebas 96hrLC₅₀ y TCLP se utilizan para determinar si el lodo y los cortes usados son peligrosos y tóxicos o no.

3.2.2. Arabia Saudí

Hay varias regulaciones ambientales en Arabia Saudí que las compañías de perforación de pozos petroleros deben seguir. Estas regulaciones son de naturaleza corporativa, nacional, regional y global, las cuales se establecen para controlar las operaciones de perforación y minimizar su impacto en el medio ambiente. Todos los requisitos deben

ser seguidos cumplidos por los operadores cuando trabajen para Saudi Aramco en sus áreas operativas (Abu Khamsin, 1997).

Saudí Aramco tiene fuertes estándares corporativos que contiene directrices aplicables a las políticas de protección del medio ambiente. Uno de los objetivos de la empresa es gestionar sus operaciones sin efectos adversas en el entorno circundante. Esto está muy bien establecido en varias normas de ingeniería, códigos y procedimientos departamentales que están en línea con las regulaciones y directrices nacionales. Las normas aplicables a los cortes de perforación en Arabia Saudí son (Abu Khamsin, 1997):

- **Cortes y lodos base aceite.** Todos los cortes y fluidos base aceite de los tanques y de las piscinas deben recogerse y enviarse a una planta de reciclaje o un lugar de disposición aprobado. Los cortes pueden ser enterrados en fosos después de ser tratados con la mejor tecnología con el fin de remover la mayor cantidad de aceite presente en el corte. El área debe restaurarse a su estado original después de la finalización del pozo.
- **Cortes y lodos base agua.** Todos los cortes y fluidos base agua deben ser enterrados en fosas. El área debe ser restaurada a su estado original después de finalizar los trabajos de perforación.

Reglamento nacional para operaciones de perforación en Arabia Saudí. Hay dos regulaciones nacionales que se refieren a las operaciones de perforación en Arabia Saudí, el Decreto Real No. M/9 y la Administración de Meteorología y Protección Ambiental (Abu Khamsin, 1997).

- **Decreto Real No. M/9.** Este decreto, de fecha 18 de noviembre de 1987, se emitió para proteger y regular la pesca y para proteger y prevenir la explotación de la vida

mariana en las aguas territoriales saudíes. Los operadores de perforación deben ejercer las mejores prácticas para proteger el medio ambiente.

- **Administración de Meteorología y Protección Ambiental (MEPA).** La MEPA emitió un documento estándar general No. 1409-01 con el fin de proporcionar las bases para la evaluación y regulación de las actividades industriales y urbanas con el propósito de ayudar en la planificación, el diseño, la ejecución y el funcionamiento de las instalaciones que no afecte negativamente la salud, la seguridad y el bienestar de las personas y ayude a su vez a promover el bienestar económico y social.

Las regulaciones que se refieren a las operaciones de perforación en estas normas son (Abu Khamsin, 1997):

- **Normas de calidad del aire.** El propósito de estas normas es prevenir los efectos adversos para la salud humana y los daños a la vegetación, la fauna y la flora. Estas normas se encuentran relacionada en la **Cuadro 13**.

Cuadro 13. Estándares nacionales de calidad del aire

Contaminante	Periodo de	Concentración	Excedencias permitidas
	tiempo promedio	Max ug/m3 (ppm)	
Dióxido de azufre	1 hr	730 (0.280)	2 por cada 30 días
	24 hrs	365 (0.140)	1 por año
	1 año	80 (0.030)	0 por año
Sulfuro de Hidrógeno	1 hr	200 (0.140)	1 por año
	24 hrs	660 (0.350)	1 por año
Dióxido de nitrógeno	1 hr	100 (0.050)	2 por cada 30 días

Oxidantes petroquímicos (medido como O3)	1 año	100 (0.050)	0 por año
Inhalable Material particulado	1 hr	295 (0.150)	2 por cada 30 días
	24 hrs	340	1 por año
Monóxido de carbono	1 año	80	0 por año
	1 hr	40000 (35)	2 por cada 30 días
	8 hrs	10000 (9)	2 por cada 30 días
Fluoruros (F)	30 días	1.0 (9.001)	0 por cada 30 días

Fuente: Abu Khamsin, 1997.

- **Normas para descarga directa.** Estas normas se aplican a cualquier tipo de descarga, como aguas residuales sanitarias, escorrentías superficiales, descarga de agua de refrigeración, aguas residuales procesadas y cualquier otro tipo de agua residual. Estas normas se enumeran en la **Cuadro 14**.

Cuadro 14. limitaciones de descarga de efluentes según MEPA

<u>Contaminantes Físicoquímico</u>	
1. Flotantes	Ninguno
2. pH	6 a 9
3. Sólidos totales suspendidos (SST)	15 mg/L (max)
4. Temperatura	Caso por caso
5. Turbidez	75 NTU (max)
6. Salinidad	-
<u>Contaminantes Orgánicos</u>	
	mg/L
1. Demanda bioquímica de oxígeno	25
2. Demanda química de oxígeno (CDO)	150

3. Carbón orgánico total (TOC)	50
4. Total de hidrocarburos clorados	0.1
5. Grasas y aceites	8
6. Fenoles	0.1
<u>Contaminantes no Orgánicos g/L media de 30 días</u>	
1. Aluminio	-
2. Amoníaco	1.0
3. Arsénico	0.1
4. Bario	-
5. Cadmio	0.02
6. Cloro (residual)	0.5
7. Cromo	0.1
8. Cobalto	-
9. Cobre	0.2
10. Cianuro	0.05
11. Oxígeno disuelto	-
12. Fluoruro	-
13. Hierro	-
14. Plomo	0.1
15. Manganeseo	-
16. Mercurio	0.001
17. Níquel	0.2
18. Fosfato	1.0
19. Sulfuro	-
20. Zinc	1.0
	MPN por
<u>Contaminantes biológicos</u>	100ml
1. Coliformes totales	1000

Fuente: Abu Khamsin, 1997.

3.2.3. Estados Unidos

En los Estados Unidos, aunque la mayoría de los residuos de perforación de pozos petroleros están exentos de las reglamentaciones sobre residuos peligrosos de la RCRA (Resource Conservation and Recovery Act), siguen estando muy regulados. Al momento de tomar decisiones con respecto a la disposición final de residuos, las compañías petroleras se guían primero por las reglamentaciones estatales y federales que especifican de qué forma se deben manejar ciertos residuos o brindan una lista de prácticas de disposición permitidas (Bansal K. M., Sugiarto, 1999).

Este país es un ejemplo de agencias duales de control regulatorio. Los dos niveles de organismos reguladores incluyen el nivel federal o nacional y el nivel estatal. En cada uno de esos niveles, hay un cuerpo legislativo electo que adopta las leyes y una agencia gubernamental separada que redacta y hace cumplir los reglamentos basados en las leyes. A nivel federal, el Congreso aprobó una ley de manejo de residuos, la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos, RCRA por sus siglas en inglés, que cubre la mayoría de los tipos de residuos. La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., EPA por sus siglas en inglés, estableció regulaciones para el manejo de la mayoría de los tipos de residuos peligrosos y no peligrosos. Sin embargo, la EPA define legalmente los residuos de yacimientos petrolíferos como exentos del programa regulatorio de residuos peligrosos y, por lo tanto, está abierto a la interpretación a nivel estatal. La EPA depende de que los estados tomen la iniciativa en la regulación de la gestión de residuos de campos petroleros y la creación de un programa de residuos sólidos (Clements, Kayli , Veil, John A., and Arthur J. Leuterman, 2010).

Los siguientes tres estatutos establecen requisitos federales para el manejo y disposición de residuo de perforación. Estos son implementados principalmente por agencias estatales que han desarrollado programas regulatorios para cumplir o exceder los requisitos mínimos bajo cada estatuto (Bansal, K. M., Sugiarto, 1999).

a. Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA)

Esta ley fue promulgada en 1976, la RCRA regula el manejo y la disposición de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos, y afecta el manejo de todos los tipos de residuos de las actividades de perforación.

Hay tres formas en que un residuo sólido puede considerarse peligroso según las reglamentaciones de la EPA:

- ✓ El residuo está específicamente enumerado en las reglamentaciones de la EPA, por ejemplo, solventes halogenados gastados.
- ✓ EL residuo se prueba y cumple con una de las cuatro características establecidas por EPA que son inflamable, corrosivo, reactivo o tóxico.
- ✓ El residuo es declarado peligroso por el generador.

El término "residuo peligroso" significa un residuo sólido o una combinación de residuos sólidos que, debido a su cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas, pueden (Bansal, K. M., Sugiarto, 1999):

- ✓ Causar o contribuir significativamente a un aumento de la mortalidad o a un aumento de la enfermedad grave irreversible o incapacitante reversible.
- ✓ Represente un peligro sustancial actual o potencial para la salud humana o el medio ambiente cuando se trata, almacena, transporta o dispone de manera inadecuada, o se maneja de otra manera.

En Estados Unidos la EPA considera que cualquier residuo no exento es un residuo peligroso si presenta alguna de las características de inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad.

Estas características se describen a continuación:

- **Inflamabilidad**

Un desecho sólido es inflamable si: Es un líquido y tiene un punto de inflamación de 60 °C (140 °F), no es un líquido y es capaz de provocar un incendio por fricción, absorción de humedad, o cambios químicos espontáneos y, cuando se enciende, se quema tan vigorosa y persistentemente que crea un peligro, es un gas comprimido inflamable, y es un comburente.

- **Corrosividad**

Un desecho sólido es corrosivo si: Es acuoso y tiene un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5 y es líquido y corroe el acero a una velocidad mayor a 0.25 pulgadas por año.

- **Reactividad**

Los residuos reactivos normalmente son inestables, reaccionan violentamente con el aire o el agua, o forman mezclas potencialmente explosivas con el agua. Esta categoría también incluye residuos que emiten humos tóxicos cuando se mezclan con agua y materiales capaces de detonar.

- **Toxicidad**

Un desecho sólido es tóxico si el extracto de una muestra representativa del residuo no pasa el procedimiento de prueba de lixiviación de características de toxicidad (TCLP). El TCLP requiere el análisis de una lista de 39 sustancias químicas, compuestas por 8 metales, 6 pesticidas y 25 sustancias orgánicas. Se han establecido niveles máximos de contaminantes para metales pesados (como Arsénico (5,0 mg/l), Bario (100 mg/l), Cadmio (1,0 mg/l), Cromo (5,0 mg/l), Plomo (5,0 mg/l)), mercurio (0,2 mg/l), selenio (1,0 mg/l) y plata (5,0 mg/l)); y para compuestos orgánicos como benceno (0,5 mg/l) y tricloroetileno (0,5 mg/l) en el extracto utilizando el método TCLP.

b. Ley de Agua Potable Segura (SDWA)

La SDWA se aprobó en 1974, posteriormente se aprobó la legislación para la regulación de los pozos de inyección subterráneos bajo el programa de Control de Inyección Subterránea, UIC por sus siglas en inglés.

La EPA estableció una clase especial de pozos (Clase II) para disponer los fluidos que se extraen a la superficie en relación con la producción y el tratamiento de petróleo y gas; inyectar fluidos para la recuperación mejorada de petróleo y gas; o para el almacenamiento de hidrocarburos líquidos a temperatura y presión estándar. Las reglamentaciones reconocen los requisitos legales de que la regulación de los pozos de inyección de Clase II no debe interferir ni impedir la producción de petróleo y gas, a menos que sea esencial para prevenir el peligro de las fuentes subterráneas de agua potable, USDW por sus siglas en inglés. Un USDW es un acuífero que suministra agua potable para consumo humano o cualquier sistema público de agua o contiene menos de 10,000 mg/l de sólidos disueltos totales, y no contiene minerales o hidrocarburos que sean comercialmente producibles, y está situado a una profundidad o ubicación que hace que la recuperación de agua para fines de agua potable sea económica o tecnológicamente práctica (Bansal, K. M., Sugiarto, 1999).

Los requisitos mínimos más significativos que deben cumplir los pozos Clase II son los siguientes:

- ✓ Solo se pueden inyectar fluidos de E&P aprobados.
- ✓ Ningún pozo puede poner en peligro los USDW.
- ✓ A menos que lo permita la regla, todos los pozos deben estar autorizados antes de la construcción.
- ✓ Todos los pozos deben demostrar periódicamente integridad mecánica. La EP A define la integridad mecánica como la ausencia de fugas significativas en el

revestimiento, la tubería y el obturador, y la ausencia de movimiento significativo de fluidos hacia fuentes subterráneas de agua potable a través de canales verticales adyacentes al pozo de inyección.

c. Ley de Agua Limpia (CWA)

La CWA por sus siglas en inglés, se promulgó en 1972 principalmente para controlar las descargas de fuentes puntuales en aguas de los Estados Unidos. Todas las descargas puntuales requieren el Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (NPDES) o permisos estatales equivalentes. Las descargas de agua producida, lodo de perforación, agua de refrigeración, etc., son ejemplos de descargas de fuentes puntuales. Las condiciones del permiso generalmente requieren un monitoreo y un informe periódicos de los componentes de los efluentes descargados que no pueden exceder los estándares de concentración específicos basados en la tecnología o en la calidad del agua (Bansal, K. M., Sugiarto, 1999).

Departamento de Recursos Naturales de Louisiana. Fue creado en 1976, es uno de los veinte departamentos bajo la rama ejecutiva del gobierno estatal. El funcionario ejecutivo es el secretario designado por el Gobernador, junto con la Oficina del secretario hay tres oficinas principales del departamento las cuales son: la Oficina de Manejo Costero, la Oficina de Conservación y la Oficina de Recursos Minerales (Department of Natural Resources).

Las reglas que rigen el Departamento de Recursos Naturales son parte del Código Administrativo de Luisiana (LAC) por sus siglas en inglés, mantenido por la División de Administración y la Oficina del Registro Estatal.

La misión del Departamento de Recursos Naturales es asegurar y promover el uso sostenible y responsable de los recursos naturales del estado para que estén disponibles para el disfrute y beneficio de los ciudadanos ahora y en el futuro.

Protocolo Louisiana 29-b. La Norma Louisiana 29-B según el artículo 313 reglamenta el almacenamiento, tratamiento y disposición de residuos de exploración, producción y perforación de pozos de petróleo y gas (Protocolo Louisiana 29b).

De acuerdo con la norma, los fluidos de las piscinas de almacenamiento, así como los lodos de perforación, cortes de perforación y otros tipos de residuos generados durante las actividades de perforación de pozos se pueden disponer en el sitio de generación siempre y cuando se cumplan los criterios técnicos mencionados a continuación (Protocolo Louisiana 29b).

Todas las técnicas de clausura de piscinas o fosos, excepto la solidificación, la mezcla de residuos y suelo deben cumplir los siguientes criterios para su disposición final (Protocolo Louisiana 29b):

- pH entre 6 y 9 para tratamiento de sólidos y entierro in situ.
- PH entre 6 y 12 para solidos destinados al desarrollo de terrenos para viviendas, industrias, lotes, agricultura.
- Contenido de metales relacionados en el **Cuadro 15**.

Cuadro 15. Limites permisibles de metales presentes en el residuo

Parámetros	Limites (ppm)
Arsénico	10
Bario	20.000
Cadmio	10
Cromo	500
Plomo	500
Mercurio	10
Selenio	10

Plata	200
Zinc	500

Fuente: Protocolo Louisiana 29b

Para aplicaciones en tierra, las piscinas que contienen residuos se pueden clausurar en el sitio de generación mezclando los residuos con tierra la cual se obtiene de diques o áreas adyacentes, la mezcla de residuos y suelo al finalizar las operaciones debe cumplir con los siguientes criterios (Protocolo Louisiana 29b):

- pH entre 6 y 9 para tratamiento de sólidos y entierro in situ.
- PH entre 6 y 12 para solidos destinados al desarrollo de terrenos para viviendas, industrias, lotes, agricultura.
- Contenido de metales relacionados en el **Cuadro 15**.
- Contenido de grasas y aceites menor al 1 %
- Parámetros adicionales presentados en el **Cuadro 16** para disposición de residuos en áreas que presentan agua dulce en zonas poco con probabilidad baja de inundación.

Cuadro 16. Parámetros adicionales en zonas poco inundables

Parámetro	Límite permitido
Conductividad eléctrica	< 8 mmhos/cm
Relación de adsorción de sodio	< 14
Porcentaje de sodio intercambiable	25 %

Fuente: Protocolo Louisiana 29b

- Parámetros adicionales para disposición de residuos en zonas altas presentados en el **Cuadro 17**.

Cuadro 17. Parámetros adicionales en zonas altas

Parámetro	Límite permitido
Conductividad eléctrica	< 4 mmhos/cm
Relación de adsorción de sodio	< 12
Porcentaje de sodio intercambiable	< 15 %

Fuente: Protocolo Louisiana 29b

Para entierro in situ, las fosas o piscinas que contienen residuos pueden clausurarse mezclando los residuos con tierra y enterrando la mezcla en el sitio, siempre y cuando el material a enterrar cumpla con los siguientes criterios (Protocolo Louisiana 29b):

- pH entre 6 y 9 para tratamiento de sólidos y entierro in situ.
- PH entre 6 y 12 para solidos destinados al desarrollo de terrenos para viviendas, industrias, lotes, agricultura.
- Contenido de humedad menor al 50 % en peso.
- Conductividad eléctrica menor a 12 mmhos/cm.
- Contenido de aceite y grasa menor al 3 % en peso.
- Al clausurar una piscina o una fosa la parte superior debe quedar mínimo a 5 ft del suelo y debe estar cubierto por 5 ft de tierra nativa.
- El fondo de la piscina o fosa clausurada debe estar al menos 5 ft por encima del nivel freático.

3.2.4. Canadá

La mayoría de las operaciones de perforación en Canadá involucran operaciones en tierra en las cuales se utilizan lodos base agua y aceite, sin embargo, los lodos base aceite son de gran preocupación para las agencias ambientales canadienses. El landfarming de los cortes de perforación es el principal método de disposición, no

obstante, varias áreas han tenido problemas con la recuperación de la tierra después aplicar dicha técnica. (Jones, F.V., and A.J.J. Leuterman, 1990).

En Canadá la disposición final de residuos de la industria del petróleo y Gas ha sido regulada desde 1975 por una agencia llamada Junta de Conservación de Recursos Energéticos (ERCB) por sus siglas en inglés, la cual establece pautas y tasas de aplicación para todas las técnicas de gestión de residuos de yacimientos petrolíferos que se ofrecen en Alberta (Clements, Kayli, Veil, John A., Arthur J. Leuterman, 2010).

La ERCB en 1993 publicó la Directiva Provisional ID-OG-75-2., La Directiva Interina (ID) 93-1 y la Guía 50 de Gestión de Residuos de Perforación. Luego, en 1996, emitió una revisión de la Guía 50 que se introdujo con la Carta de Información (IL) 96 -13: Revisión de la Guía 50 Gestión de Residuos de Perforación, para finalmente cambiar el nombre de la Guía 50 a Directiva 50. La cual se revisó el 2 de mayo de 2012 y se alineó con las pautas de remediación de suelos y aguas subterráneas (Assessing Drilling Waste Disposal Areas, 2012)

Junta de Conservación de Recursos Energéticos (ERCB). Establecida por el Gobierno de Alberta en 1938 y conocida primero como la Junta de Conservación de Petróleo y Gas Natural, el propósito de la agencia era garantizar que se siguieran los procedimientos adecuados en el desarrollo y la producción de petróleo y gas en toda la provincia. Este organismo independiente desarrolló y aplicó políticas para la conservación efectiva de los recursos de petróleo y gas de Alberta. Desde el período de exceso de capacidad productiva que siguió al gran descubrimiento de Leduc en 1947, ha regulado las tasas de producción para permitir el acceso equitativo a los mercados de todos los productores. También asegura que solo el gas natural excedente para las necesidades a largo plazo de Alberta se venda fuera de la provincia (David H. Breen, 206).

En 1971, el mandato de la junta se amplió para incluir oleoductos, carbón y electricidad, y su nombre se cambió a la Junta de Conservación de Recursos Energéticos. Compuesta por hasta 6 miembros designados por el gobierno, las responsabilidades de la junta se establecen en las leyes de la legislatura. La junta, apoyada por un personal técnico y profesional, debe regular la operación de las instalaciones de energía existentes, evaluar y decidir sobre las solicitudes de proyectos de energía nuevos o renovados. El ERCB también proporciona estadísticas e información integrales al público, el gobierno y la industria sobre todos los aspectos del sector de recursos energéticos de Alberta (David H. Breen, 2006).

Directiva 50 de Alberta (edición de 2012). Esta es probablemente una de las regulaciones más completas sobre la gestión de residuos de la industria petrolera a nivel mundial. La nueva directiva integra los fluidos de perforación de alto rendimiento en los límites de disposición, también, realinea los límites de disposición con las pautas de remediación de suelos y aguas subterráneas. de Alberta. Se requieren pruebas y muestreo de material en varios niveles de la operación (Ana Djuric, 2012):

- Antes de perforar se analizan muestras de suelo para determinar la idoneidad de la selección del sitio.
- Algunos tipos de métodos de disposición como Landspray durante la perforación requieren pruebas genéricas de sistemas de lodo para predecir cumplimiento de la regulación.
- Durante las operaciones de perforación las muestras se envían a un laboratorio para determinar las proporciones finales de la mezcla y la idoneidad de los residuos.
- Por último, es posible que en algunos casos se requiera el muestreo posterior a la disposición.

Los métodos de disposición final de cortes base agua relacionados en el **Cuadro 18.** están contemplados dentro de la Directiva 50 de Alberta. Se excluyen algunas técnicas,

como la desorción térmica, ya que no se introducen intencionalmente hidrocarburos en las formulaciones de este método (Ana Djuric, 2012).

Cuadro 18. Métodos de disposición Directiva 50 de Alberta.

Métodos de disposición	Definición acorde a Directiva 50 de 2012
Landspray	Un método de disposición de residuos de perforación que implica la dispersión de fluidos de residuos en un campo rociándolos a una tasa constante especificada desde un camión aspirador o equipo similar.
Landspray While Drilling (LWD)	Un método de disposición de residuos de perforación que es similar al Landspray, pero que se limita a lodos o cortes de perforación a base de agua no tóxicos, lo que permite reducir los requisitos de prueba y proceder a la disposición sin necesidad de almacenar el residuo previo a la disposición.
Disposición en Tierras Públicas Forestales	Un método de disposición de residuos de perforación que es similar al Landspray y al LWD, pero que permite tasas de aplicación más altas y se limita a ocurrir en tierras provinciales.
Landsread	Un método de disposición de residuos de perforación que implica la distribución e incorporación de residuos sólidos en el subsuelo a poca profundidad con una retroexcavadora o equipo similar.
Disposición subterránea de residuos durante la perforación	Este método es un proceso planificado que consiste en desechar los residuos de perforación en el fondo de un pozo que está en proceso de perforación y al que se le colocó y cementa un revestimiento a una profundidad que proteja las aguas subterráneas. La zona que se utilice para la disposición debe estar

	aislada de cualquier zona con hidrocarburos y aguas subterráneas.
Métodos de gestión alternativos	Se requiere la aprobación del ERCB para gestionar los residuos de perforación de una manera alternativa a los requisitos establecidos en esta directiva.

Fuente: Ana Djuric, 2012.

3.2.5. Comparación de Opciones de Gestión de Residuos de perforación

El **Cuadro 19 y 20** muestra la comparación de las opciones de gestión y disposición de residuos para Colombia con varios países, estados y provincias de los hemisferios occidental y oriental que representan una sección transversal de los entornos normativos del mundo. Este cuadro se refiere únicamente a residuos sólidos, fluidos y cortes de perforación, no incluye agua de producción (Clements, Kayli, Veil, John A., Arthur J. Leuterman, 2010).

Cuadro 19. Comparación de las opciones de gestión de residuos de una muestra representativa de países, estados y provincias (x indica que las opciones están permitidas)

Fuente: Clements, Kayli, Veil, John A., Arthur J. Leuterman, 2010.

Estado/ País	Landfarmi ng/ Tratamient o Biológico	Landspreadi ng	Incineraci ón	Inyecci ón	Estabilizaci ón/ Solidificació n	Entierr o	Landfi ll	Reusab le
Alaska				x				
Alberta	x	x				x	x	
Angola			x					
Argentina	x	x	x	x		x		x
Arkansas	x	x	x	x			x	x
Bangladesh	x							
Brasil	x	x	x	x			x	x
British Columbia	x	x				x		
California		x		x		x	x	x
China					x	x		
Colorado	x	x		x		x	x	x
Alemania				x			x	
India						x		
Louisiana	x	x	x	x	x	x	x	x
México			x	x			x	x
Nueva Zelanda	x	x				x	x	x
Nigeria	x	x	x	x	x		x	x
Perú	x	x						
Romania			x	x			x	
Saskatchewan	x	x				x		

an								
Texas	x	x		x			x	x
Trinidad						x		x
Uganda					x	x		
Venezuela	x	x				x		
Virginia del Oeste				x		x		
Oklahoma	x	x		x	x	x	x	x
Pennsylvania	x	x				x	x	
Rusia			x	x	x	x	x	x
Colombia	x		x		x	x	x	

Cuadro 20. Comparación de la gestión de residuos sólidos en Colombia con el resto del mundo

Similitudes	Diferencias
<ul style="list-style-type: none"> • El tratamiento de residuos ha ido evolucionando a través de la historia, a medida que se avanza técnicamente en esta temática. • Tienen como objeto promover y facilitar la planificación, construcción y operación de sistemas de disposición final de residuos sólidos de perforación. • Cuentan con entes estatales que regulan la disposición final de cortes de perforación. • La conservación efectiva de los recursos de petróleo y gas. • Beneficios económicos • El cuidado del medio ambiente • Reutilización de los residuos en otras industrias. • Mitigación de impactos negativos en el medio ambiente. • En muchos casos, los países han reconocido que no todos los materiales enviados al fondo del pozo son necesariamente un desperdicio cuando regresan a 	<ul style="list-style-type: none"> • Los estándares y las regulaciones para el manejo de cortes de perforación cambian según el país y provincia. • Hay países con estándares mucho más altos para la disposición y reutilización de cortes de perforación. Algunas razones de la diferencia podrían deberse a la estructura del suelo, la profundidad del agua subterránea, la población, la biodiversidad. • Algunos Países como Nueva Zelanda han empezado a implementar fluidos de perforación ecológicos para luego ser reutilizados como fertilizante al final del proceso de tratamiento.

<p>la superficie.</p> <ul style="list-style-type: none">• Clasificación de los residuos en peligrosos y no peligros según contenido de metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánico.• La mayoría de países han escogido el entierro como método principal de disposición final de cortes de perforación• La gestión de residuos sólidos en Colombia trata de acercarse mucho a la de Estados Unidos, a tal punto de implementar el Protocolo Louisiana 29-b para el tratamiento y disposición de residuos sólidos.	
--	--

Fuente: Autor

4. ALTERNATIVAS PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE CORTES DE PERFORACIÓN BASE AGUA.

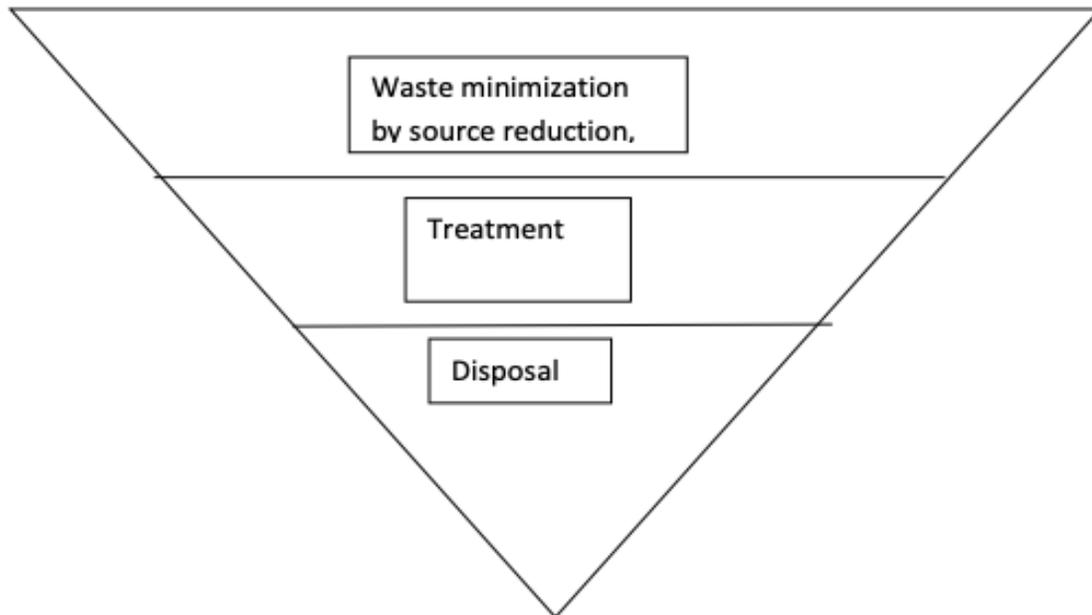
La disposición final de cortes y fluidos de perforación es uno de los problemas que enfrenta la industria del petróleo y el gas. Los procesos de perforación de pozos de petróleo y gas generan grandes volúmenes de cortes de perforación y lodo. Los operadores en tierra y en mar han utilizado una variedad de métodos para gestionar estos residuos (Simiyu E. Lilian; Mburu Esther; Rukunga Allan, 2016).

4.1. JERARQUÍA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS

Históricamente, los residuos de los campos petroleros se manejaban de la manera más conveniente o menos costosa. Durante la última década, la industria del petróleo y gas ha buscado enfoques de gestión de residuos que minimicen la generación y las técnicas de disposición que ofrezcan una mayor protección ambiental y seguridad pública. Como se ilustra en la **Figura 10**, existe una jerarquía de gestión de residuos compuesta de tres niveles, en la que el operador intenta gestionar primero los residuos en el nivel más amigable con el medio ambiente y luego avanza al segundo y tercer nivel según sea necesario. En el primer escalón se modifican procesos, se adaptan tecnologías o se sustituyen productos para que se generen menos residuos. Cuando sea factible, la minimización de residuos a menudo puede ahorrar dinero y puede resultar en una mayor protección del medio ambiente (John A. Veil, 2002).

Se debe pasar al segundo nivel con los residuos producto del primer nivel, en este nivel los residuos se reutilizan o reciclan según su composición. Algunos residuos no pueden ser reciclados ni reutilizados y deben gestionarse a través del tercer y último nivel que consiste en la disposición final del residuo. Para algunas de las opciones de disposición, los residuos deben ser tratados antes de su disposición (John A. Veil, 2002).

Figura 10. Jerarquía de disposición final de residuos.



Fuente: Lilian, Simiyu E., Esther, Mburu , and Rukunga Allan, 2016.

Durante las primeras décadas de la industria del petróleo y el gas, los residuos de perforación se consideraban productos indeseables que debían disponerse de la manera más fácil o rápida posible. Las prácticas de gestión de residuos estaban casi todas en el tercer nivel de gestión de residuos: disposición. La industria no es única en este enfoque; hace más de 70 años, casi todas las principales industrias crecían y la economía se expandía. Dada la filosofía que prevalecía en aquellos tiempos anteriores, se emplearon pocos enfoques de gestión de residuos coordinados o ambientalmente beneficiosos. Los residuos de perforación onshore generalmente se disponían en sitios arrendados, en carreteras o propiedades cercanas, y los residuos de perforación en offshore generalmente se descargaban en el océano. Algunas de estas prácticas se trasladan hasta el presente, pero ahora están controladas por restricciones y políticas legales y ambientales para proteger el medio ambiente y las comunidades. Ejemplos de

algunas de estas prácticas son el landspreeding, road spreeding y la descarga en el océano (John A. Veil, 2002).

En la actualidad, la mayoría de los residuos de perforación en tierra se disponen en el sitio del pozo del que se generaron. En las plataformas marinas, la mayoría de los lodos y cortes base agua y los cortes sintéticos se descargan en el océano. Sin embargo, algunos residuos de perforación generados en campo se envían a instalaciones comerciales de disposición fuera del sitio y cualquier corte base aceite generado alta mar debe llevarse a tierra para su disposición o inyectarse bajo tierra en el sitio del pozo. Es importante tener en cuenta que la mayoría de los lodos base aceite y sintéticos se reciclan (John A. Veil, 2002).

4.2. DISPOSICIÓN FINAL DE CORTES DE PERFORACIÓN

El tratamiento se utiliza para reducir el volumen y/o la toxicidad de los residuos y colocarlos en una posición adecuada para su disposición final. Las opciones de disposición dependen en gran medida de las características de los residuos y de los requisitos reglamentarios. Existen varias prácticas para disponer los cortes de perforación de la industria petrolera, tal y como se describe a continuación (S. I. Onwukwe and M. S. Nwakaudu, 2012).

4.2.1. Disposición Offshore

La elección del método de disposición a adoptar suele ser una tarea muy desafiante, ya que depende de otros factores como las condiciones ecológicas, la regulación ambiental y el costo. Por ejemplo, es más barato descargar residuos en el océano que transportarlos a una instalación de disposición en tierra, sin embargo, los requisitos ambientales actuales para la descarga de residuos son muy estrictas. Hay tres opciones básicas de disposición de cortes de perforación para operaciones en alta mar: Descarga en alta mar, reinyección de cortes y transporte a tierra las cuales se describen

a continuación (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

Descarga en alta mar. La descarga de cortes de perforación en el océano es quizás el método de disposición más económico y seguro desde el punto de vista operativo. Esto es porque no requiere equipo adicional al que convencionalmente se encuentra en la zona de perforación. Este método de disposición es adecuado para cortes base agua, ya que requieren poco o ningún tratamiento antes de su eliminación. Los fluidos de base aceitosas, sin embargo, deben ser tratados a un nivel ambientalmente aceptable antes de ser descargados en el mar.

Los cortes base agua se mezclan con agua de mar y se descargan a través de una tubería conocida como “downcomer”. El extremo del tubo normalmente se encuentra a unos pocos metros por debajo de la superficie del agua. El residuo descargado caerá al fondo del mar y se acumulará en diferentes grados. Para los cortes de perforación no acuosos, la concentración en los sedimentos normalmente será elevada y la biota marina puede verse afectada. Con el tiempo, la concentración se reducirá y la biota se recuperará, pero las escalas de tiempo varían según el espesor de la acumulación y las características de recepción (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017). En el **Cuadro 21** se relacionan las ventajas y desventajas de la descarga de cortes de perforación offshore.

Cuadro 21. Ventajas y desventajas de descarga Offshore.

	Ventajas	Desventajas
Económicas	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo por volumen tratado • Sin responsabilidades en áreas de disposición final en 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibles pasivos a futuros. • Costo del análisis y monitoreos de descargas e impactos potenciales.

	<p>tierra ya que la descarga se hace directamente en alta mar.</p>	
Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso simple con poco equipo necesario. • Sin costo de transporte involucrado. • Requerimientos de baja potencia. • Bajo requerimiento de personal. • Bajo riesgo de seguridad. • No se requiere infraestructura en tierra. • No se requiere espacio ni almacenamiento adicional. • Sin restricciones climáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requisito de gestión de los constituyentes líquidos. .
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Sin emisiones al aire. • Bajo uso de energía. • No hay problemas 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial impacto a corto plazo en la biología del fondo marino.

	ambientales en los sitios en tierra.	
--	---	--

Fuente: Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017.

La descarga de cortes de perforación en alta mar puede ser permisible siempre y cuando los cortes cumplan con los criterios legales de descarga. La descarga en alta mar tiene los siguientes beneficios generales (International Association of Oil and Gas Producers, 2016):

- Reducción de riesgos de seguridad, evita el movimiento de la caja de cortes.
- Reducción del impacto ambiental relacionado con el movimiento del barco.
- Reducción en los costos de transporte.
- Suficiente espacio disponible para realizar la disposición de cortes.

Reinyección de cortes. La reinyección de corte es común tanto para las operaciones en alta mar como en tierra, la tecnología de inyección de cortes involucra la molienda de sólidos en pequeñas partículas, mezclándolos con agua o algún otro líquido para hacer lodo e inyectarlo en el subsuelo a presiones lo suficientemente altas como para fracturar la roca. Las dos formas comunes en que se inyectan lodos en las formaciones son a través del espacio anular del pozo o en un pozo de disposición exclusivo. Los pozos de disposición están diseñados para proporcionar un medio de transporte de residuos fluidos a una formación geológica subterránea de una manera que no afecte negativamente al medio ambiente (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

Actualmente, la elección del método óptimo de inyección de cortes de perforación debe hacerse con referencia a consideraciones operativas, legales, ambientales y económicas. La formación candidata para disposición debe estar geológica y mecánicamente aislada de las fuentes utilizables de agua para evitar la filtración de los

residuos a cuerpos de agua. En términos generales esta formación no debe contener petróleo o gas en cantidades comerciales, la formación debe tener una buena porosidad y permeabilidad. Este proceso de disposición de recortes de perforación en alta mar es reconocido como muy respetuoso con el medio ambiente y ha demostrado ser más económico que la disposición de cortes de perforación en tierra (Ahammad Sharif MD*, Nagalakshmi NVR, Srigoiri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017). En el **Cuadro 22** se relacionan las ventajas y desventajas de la reinyección de cortes onshore.

Cuadro 22. Ventajas y desventajas de reinyección de cortes en alta mar.

	Ventajas	Desventajas
Económicas	<ul style="list-style-type: none"> • Permite el uso de un fluido de perforación menos costoso. • No se necesita transporte en alta mar. • Capacidad para disponer otros residuos que tienen que ser llevados a tierra para su disposición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso y de mucho trabajo. • El apagado del equipo de inyección puede detener las actividades de perforación.
Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Los cortes se pueden inyectar si se tratan previamente. • Tecnología probada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplio equipamiento y contratación de mano de obra. • La aplicación requiere formaciones con propiedades específicas.

		<ul style="list-style-type: none"> • Dificil para pozos exploratorios por falta de conocimiento de la formaci3n.
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminaci3n del impacto en el fondo marino. • Limita la posibilidad de contaminaci3n de aguas superficiales y subterr3neas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la contaminaci3n del aire debido a las largas horas de trabajo de motores y equipos usados para la inyecci3n de los cortes.

Fuente: Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017.

Transporte a tierra. Esto implica el transporte de cortes asociado a una instalaci3n de tratamiento en tierra, si es necesario, y finalmente se disponen mediante t3cnicas como Land Farming/ Land-Spreading, inyecci3n o reutilizaci3n. Estas t3cnicas son aplicables a los residuos de perforaci3n no acuosos que no pueden ser descargados o reinyectados en alta mar debido a su naturaleza o volumen t3xicos. Los factores a considerar cuando se evalúan estos m3todos incluyen la disponibilidad, los costos relacionados con la embarcaci3n y la distancia desde la plataforma hasta la costa (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

4.2.2. Disposici3n Onshore

La reinyecci3n de corte es com3n tanto para las operaciones en alta mar como en tierra. Sin embargo, hay muchas m3s opciones de disposici3n de cortes de perforaci3n en tierra que en alta mar debido, entre otras cosas, a la disponibilidad de espacio en tierra. El m3todo de disposici3n onshore m3s com3n es quiz3s el entierro in situ. Otros m3todos incluyen la construcci3n de un pozo de reserva de residuos, m3todos de

tratamientos térmicos como incineración, hornos, quema a cielo abierto. También existen métodos biológicos como compostaje, land-spreading, land-farming, entre otros. A continuación, se exponen las técnicas de disposición de cortes de perforación comúnmente utilizadas en operaciones onshore (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017)

4.2.2.1. Entierro in situ

El entierro in situ es la colocación de residuos en excavaciones naturales o hechas por el hombre, como fosas o Landfills. Es la técnica más común utilizada para la disposición de los residuos de perforación como lodo y cortes, puede ser la técnica de disposición menos eficiente. Este método puede no ser una buena opción para los residuos que contienen altas concentraciones de aceite, sal, metales, productos químicos industriales y otros materiales con componentes dañinos que podrían migrar del hueco y contaminar los recursos hídricos utilizables (S. I. Onwukwe and M. S. Nwakaudu, 2012).

La desventaja de este método es que, por lo general, produce condiciones anaeróbicas. Esto limita cualquier degradación adicional en comparación con los residuos que son dispuestos como land-farmed o land-spread, donde predominan las condiciones aeróbicas (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

El entierro in situ se diferencia del land farming en que los residuos tratados se esparcen en un terreno adecuado, mientras que en el land farming la biorremediación de los residuos tiene lugar después de que se hayan esparcido (Getliff, J. M., Silverstone, M. P., Sharman, A. K., Lenn, M., and T. Hayes, 1998).

Fosas. El entierro en fosas como se observa en la **Figura 11**, es un método de bajo costo y baja tecnología que no requiere que los residuos sean transportados fuera del sitio del pozo. El uso de fosas es una parte esencial de cualquier operación de manejo

de residuos de perforación en tierra (Islam, M.R.; Khan, M.I., 2007). Si bien sirve para muchos propósitos, uno de los principales es recolectar y retener todos los residuos asociados a la perforación. Otros usos incluyen la evaporación y el almacenamiento de agua producida y la gestión de fluidos de reacondicionamiento o terminación y para la contención de emergencia de fluidos producidos (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

Figura 11. Fosas de desechos de campos petroleros.



Fuente: M.R. Islam, M.I. Khan, 2007.

Si bien esta técnica es aceptada en la mayoría de los programas de manejo de residuos de perforación, puede representar una responsabilidad ambiental si se manejan incorrectamente. Los residuos pueden contaminar el suelo, las aguas subterráneas y las aguas superficiales con fluidos metálicos e hidrocarburos si no se manejan y cierran de forma adecuada. A medida que los fluidos del foso se evaporan, los metales solubles en agua, las sales y otras sustancias químicas se concentran. Las precipitaciones, los cambios en los niveles de aguas subterráneas poco profundas y las inundaciones pueden transferir estos contaminantes a los suelos y aguas subterráneas

adyacentes. Después de finalizar las operaciones las fosas se dejan en su lugar luego de que la plataforma de perforación y otros equipos se retiren del sitio (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

Se deben considerar diferentes factores cuando se trata de un entierro en fosas. Este procedimiento no es adecuado si los residuos contienen altas concentraciones de aceite, sal, metales biológicamente disponibles, químicos industriales y otros materiales con componentes nocivos que pudieran migrar y contaminar los recursos hídricos.

En áreas con aguas subterráneas poco profundas no son apropiadas, se recomienda una ubicación de al menos cinco pies por encima de cualquier acuífero subterráneo para evitar su contaminación. La parte superior de la celda debe estar debajo de la zona de raíces de cualquier planta que pueda crecer en esa área en el futuro. Para construir las fosas se prefieren áreas con suelos de baja permeabilidad, como la arcilla, que suelos de alta permeabilidad, como la arena (Islam, M.R.,Khan, M.I., 2007).

Landfill. Los landfills como se evidencia en la **Figura 12**, también se utilizan para la disposición de residuos de perforación y otros residuos de campos petroleros (Islam, M.R.,Khan, M.I., 2007).

Un landfill típico se construye en celdas, y cada celda consta de un revestimiento de arcilla compactada construido sobre la base del suelo nativo al menos tres pies por encima del nivel freático. En los landfills modernos, se instala un sistema de recolección de lixiviados sobre el revestimiento de arcilla, que luego se cubre con un revestimiento geosintético para ayudar a estabilizar los residuos. Luego, se agrega una capa de drenaje de grava o arena permeable graduada para ayudar a dirigir los líquidos hacia el sistema de recolección de lixiviados (Landfill Construction | American Foundry Society, s.f.).

Figura 12. Landfills de residuos de campos petroleros



Fuente: M.R. Islam, M.I. Khan, 2007.

En algunas áreas de campos petroleros, se operan grandes landfills para eliminar los residuos de campos petroleros de múltiples pozos. El entierro generalmente presenta como resultado condiciones anaeróbicas, lo que limita cualquier degradación adicional en comparación con los residuos que se disponen en land-farmed o land-spread donde predominan las condiciones aeróbicas. Se debe evitar la escorrentía y la lixiviación de los residuos en los landfills, con tipos apropiados y grado de controles establecidos. Las barreras naturales o revestimientos manufacturados colocados entre el material de desecho y el agua subterránea ayudan a controlar la lixiviación (Islam, M.R., Khan, M.I., 2007).

La capacidad del landfill para contener residuos dependerá de la calidad del diseño de los materiales, y de las unidades geológicas subyacentes. Una consideración clave en la operación del landfill es la necesidad de garantizar la contención a largo plazo debido a que los residuos que se depositan en vertederos no se destruyen, sino que se

almacenan a largo plazo (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

Hoy en día el tema de los landfills se ha convertido en una importante estrategia de gestión de residuos en todo el mundo, la cual sigue siendo la más importante, sensata y menos costosa estrategia de disposición de residuos. El proceso de selección de un landfill con los mínimos efectos negativos sobre el medio ambiente es una tarea compleja en la que se deben considerar varios criterios (Mohamad Amin Daneshfar, Mehdi Ardjmand, 2021).

Durante más de una década, el enfoque principal de los ambientalistas ha sido adoptar enfoques de gestión basados en riesgos para limpiar todos los hidrocarburos de sitios contaminados con consecuencias ambientales potencialmente destructivas. En la comunidad científica se han realizado pocos estudios sobre el método de selección del sitio óptimo para la perforación de cortes de perforación (Mohamad Amin Daneshfar, Mehdi Ardjmand, 2021).

Nomohanran en 2015 evaluó un sitio adecuado para la construcción de landfills en Gbekele, Nigeria. Allí utilizaron estudios geoelectrónicos, registros de sistemas geológicos y pruebas de cortes de pozos para determinar las características geotécnicas e hidrogeológicas del lugar adecuado para construir el landfill.

Saedi en 2020 evaluó la selección de landfills para residuos sólidos de perforación del campo petrolero Maroon ubicado en Irán. Para ello, se estudiaron y mapearon en el entorno del sistema de información geográfica los parámetros en el proceso de selección del sitio.

4.2.2.2. Aplicaciones en tierra

Esta técnica se define como la aplicación directa de los cortes de perforación a la tierra de manera controlada, donde los cortes son incorporados a la estructura natural del suelo. Esta técnica no incluye el landfill donde los residuos se colocan en un área designada que está aislada de entono circundante.

Los tres principales determinantes que influyen en la idoneidad de esta técnica de aplicaciones en tierra y en la tasa de aplicación son: (International Association of Oil and Gas Producers, 2016):

- **Contenido de sal:** Aumentar el contenido de sal de la tierra puede ser útil para el crecimiento de las plantas y para la productividad de las tierras agrícolas, pero también puede afectar los acuíferos.
- **Contenido de metales pesados:** Aunque el bario tiene una biodisponibilidad limitada, los metales pesados más dañinos como el plomo y el mercurio pueden estar presente en los residuos.
- **Contenido de aceite:** Hidrocarburo presente en los cortes de perforación.

Las aplicaciones en tierra varían según las diferentes jurisdicciones, algunas de estas aplicaciones son:

Land-Spray. Este método de disposición final como se ilustra en la **Figura 13**, implica rociar los cortes base agua en el subsuelo poco profundo con el fin de incorporar el residuo en el suelo. La incorporación generalmente ocurre cuando los cortes se han esparcido en la tierra cultivada y se logra combinando mecánicamente los cortes de perforación en una mezcla homogénea de suelo. Sin embargo, es importante mencionar que los residuos que se han rociado sobre terrenos con vegetación generalmente no se incorporan (International Association of Oil and Gas Producers, 2016).

Figura 13. Técnica Land-spray de cortes de perforación



Fuente: Rondine Cabot, 2019.

Los métodos típicos para rociar cortes de perforación en tierra son (Oil and Gas Commission, 2006):

1. Desgarrar el subsuelo, esparcir e incorporar los cortes de perforación en sitio.
2. Esparcir los cortes de perforación en el sitio, secar e incorporarlos al subsuelo.

Land-Spray durante la perforación (LWD). Este método se lleva a cabo mientras se realiza la perforación, implica rociar los cortes de perforación no tóxicos sobre la capa superior del suelo a tasas de aplicación bajas y controladas de manera que conserve sus propiedades químicas, biológicas y físicas, limitando la acumulación de sales y protegiendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. En caso de que sea necesaria la incorporación para cumplir con todos los criterios aplicables, se debe utilizar la opción de disposición de rociado del suelo. La aplicación controlada normalmente se lleva a cabo durante la operación de perforación. Las técnicas de

rociado pueden incluir el uso de camiones aspiradores o equipos similares (Oil and Gas Commission, 2006).

Tipo de residuos no aceptables para LWD (Saskatchewan Ministry of Energy and Resources, 1999):

- Cualquier residuo de perforación que tenga una concentración de hidrocarburos superior al 2%, puede no ser dispuesto por LWD.
- Si existe alguna incertidumbre acerca de si los residuos de perforación superan los límites de cloruros o metales debido a un cambio en el programa de perforación, los residuos deben ser dispuestos por otro método.
- Los retornos de cemento deben aislarse de los residuos del fluido de perforación y deben enterrarse debajo de un metro de relleno limpio o eliminado en un vertedero adecuado.

Los tipos de residuos aceptables para LWD se mencionan a continuación: (Saskatchewan Ministry of Energy and Resources, 1999)

- Gel de agua dulce y polímeros.
- Agua de yeso (sulfato de calcio).
- Agua de yeso nitrada.

Mix-Bury-Cover. El método de eliminación Mix-Bury-Cover (MBC) ilustrado en la **Figura 14.**, consiste en mezclar los cortes de perforación con subsuelo, a una profundidad inferior a 1 metro o 1,5 metros, para formar una masa estabilizada de suelo (Oil and Gas Commission, 2006).

Figura 14. Mix-bury-cover (MBC).



Fuente: Rondine Cabot, 2019.

Los métodos típicos de mezclar, enterrar y cubrir, para aplicar la técnica MBC son:

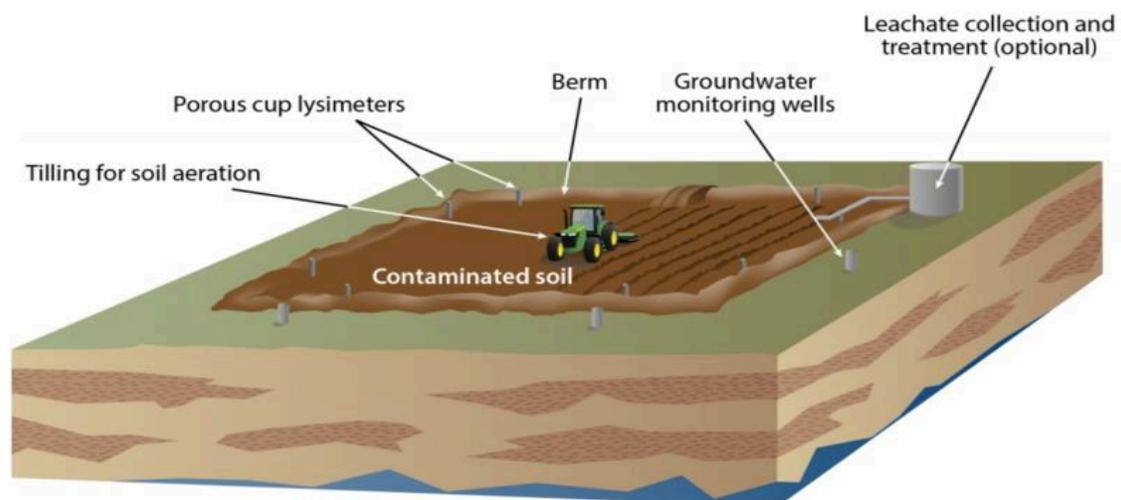
- Mezclar los residuos y el subsuelo en el sumidero y luego tapar.
- Mezclar los residuos del sumidero y del subsuelo en la superficie, luego volver a colocar la mezcla en el sumidero y finalmente cubrir.
- Acopiar los residuos del sumidero sobre la superficie, mezcle con el subsuelo y entierre.
- Extender los desechos sobre la superficie y déjelos secar. Volver a colocar el material en el sumidero, luego mezclar y finalmente cubrir.

Land Farming. Esta técnica implica esparcir los residuos en un área designada de tierra y trabajarlos en el suelo como se evidencia en la **Figura 15**. El objetivo de aplicar los residuos de perforación a la tierra es permitir que la población microbiana natural del suelo se metabolice, transforme y asimile los componentes de los residuos en el lugar.

Puede utilizarse con seguridad como un medio para inmovilizar y biodegradar muchos residuos de yacimientos petrolíferos. La capacidad de carga del suelo debe conocerse y no debe excederse para mantener las condiciones aeróbicas en el sitio (S. I. Onwukwe and M. S. Nwakaudu, 2012).

En general, Land Farming se refiere a la aplicación repetida de residuos sin tratar a la superficie del suelo, esto suele ir seguido de la labranza mecánica con la adición de nutrientes, agua, aire y oxígeno para estimular la biodegradación y la aireación del suelo por bacterias que degradan el aceite de forma natural. Este método de manejo de cortes de perforación es de costo relativamente bajo e incluso puede mejorar la capacidad de retención de agua de los suelos arenosos. Dependiendo de la ubicación de la area, es posible que se requiera un revestimiento, un revestimiento superior y/o un sistema de rociadores. Este método es eficiente en climas tropicales cálidos y pueden ser ineficientes en áreas donde el suelo está congelado la mayor parte del año (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigoiri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

Figura 15. Operación típica de Land farming.



Fuente: FILE:KAMATH1W2 FIG7.PNG - Enviro Wiki [Anónimo]. Enviro Wiki [página web]. [Consultado el 24, enero, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.enviro.wiki/index.php?title=File:Kamath1w2_Fig7.PNG>.

Este método puede ser un enfoque de gestión de costo relativamente bajo. Algunos estudios indican que el land farming no afecta negativamente a los suelos e incluso puede beneficiar a ciertos suelos arenosos al aumentar su capacidad de retención de agua y reducir las pérdidas de fertilizantes. Los compuestos inorgánicos y los metales se diluyen en el suelo y también pueden incorporarse a la matriz o pueden volverse menos solubles a través de la oxidación, la precipitación y los efectos del pH. La atenuación de metales pesados o la absorción de metales por parte de las plantas puede depender del contenido de arcilla y la capacidad de intercambio catiónico (Swedenboy, 2016).

Optimización de las operaciones de Land Farming:

La adición de agua, nutrientes y otros productos puede aumentar la actividad biológica y la aireación del suelo, evitando así el desarrollo de condiciones que podrían promover la lixiviación y la movilización de contaminantes inorgánicos. Durante períodos de condiciones secas prolongadas, también puede ser necesario controlar la humedad para minimizar el polvo (Swedenboy, 2016).

La labranza periódica de la mezcla para aumentar la aireación y las adiciones de nutrientes a la mezcla de residuos y suelo pueden mejorar la biodegradación aeróbica de los hidrocarburos. Después de aplicar los residuos, se monitorean las concentraciones de hidrocarburos para medir el progreso y determinar la necesidad de mejorar los procesos de biodegradación (Swedenboy, 2016).

Las tasas de aplicación deben controlarse para minimizar el potencial de escorrentía. El pretratamiento de los residuos mediante el compostaje y la activación de la

biodegradación aeróbica mediante el volteo regular por montones o mediante ventilación forzada por biopilas puede reducir el área necesaria para la agricultura.

4.2.2.3. Lombricultura

Este método fue desarrollado por un grupo de investigación en Nueva Zelanda. Implica el uso de lombrices de tierra para mejorar el proceso de biorremediación y convertir los cortes de perforación en fertilizante orgánico. Durante varios años, las lombrices se han utilizado para convertir los residuos orgánicos en fertilizante. Recientemente, el proceso ha sido probado y resultó exitoso en el tratamiento de ciertos residuos de perforación de base sintética. Investigadores en Nueva Zelanda han realizado experimentos para demostrar que las lombrices pueden facilitar la rápida degradación de los fluidos de perforación a base de hidrocarburos y, posteriormente, procesar los minerales en los cortes de perforación. Debido a que el estiércol de la lombriz tiene importantes propiedades fertilizantes, el proceso puede proporcionar un método alternativo de disposición de cortes de perforación (Ahammad Sharif, Nagalakshmi, Srigowri Reddy S, Vasanth G and Uma Sankar K, 2017).

4.3. MANEJO DE CORTES CONTAMINADOS CON SAL

Los cortes de perforación pueden contaminarse con sal como resultado del uso de sales en el fluido de perforación y también como resultado de la perforación a través de formación que contienen sal (International Association of Oil and Gas producers, 2016).

Los problemas asociados a la presencia de sal en los cortes de perforación son principalmente:

- La sal no es biodegradable, por lo tanto, el contenido de sal no se reduce con el tiempo por la acción microbiana, de la misma manera que con el contenido de hidrocarburos.

- La sal es fácilmente soluble lo cual la hace muy móvil en el medio ambiente.
- Las altas concentraciones de sal pueden ser tóxicas para las plantas y los organismos del suelo.

4.4. FACTORES QUE AFECTAN LAS OPCIONES DE DISPOSICIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN

Hay dos temas principales a considerar cuando se busca la mejor solución a los problemas de manejo de residuos asociados con la perforación de pozos petroleros: Legislación y Costo. En muchos casos, una tercera cuestión es de igual importancia: la Responsabilidad futura (Getliff, J. M., Silverstone, M. P., Sharman, A. K., Lenn, M., and T. Hayes, 1998).

Legislación. Las regiones donde se mantiene un alto nivel de actividad de perforación, a lo largo del tiempo los gobiernos tienden a generar niveles de regulación más estrictos. A continuación, se mencionan las tendencias relacionadas con Legislación dependiendo de la madurez en las áreas donde se realizarán operaciones de perforación, Clements, Veil y Leuterman describen tres niveles de madurez regulatoria (Ana Djuric, 2012).

- Jóvenes: bajos niveles de actividad o aparición reciente en la actividad de exploración y producción, lo que resulta en nuevos controles regulatorios.
- En desarrollo: niveles moderados de actividad con alguna información histórica de perforación y adaptación a nuevas tecnologías e influencias regulatorias.
- Madura: altos niveles de actividad con amplia información histórica de perforación que implementa controles regulatorios muy definidos, delineando tanto límites como técnicas de gestión.

Costo. Los principales factores de costo a considerar durante la gestión de cortes de perforación incluyen el requisito de transporte de los residuos para su tratamiento, el

proceso de tratamiento de residuos en sí mismo y el costo de monitorear el producto del proceso de tratamiento de residuos. En general, los costos de los procesos de gestión de residuos son inversamente proporcionales al grado de responsabilidad que debe asumir el generador de los residuos. Es decir, que los métodos más costosos suelen ser los más eficientes. No solo es muy difícil establecer los costos relativos de los procesos alternativos para tratar un residuo en particular en un momento determinado, sino que los frecuentes avances en la tecnología disponible cambian la relación entre costo y responsabilidad (Getliff, J. M., Silverstone, M. P., Sharman, A. K., Lenn, M., and T. Hayes, 1998).

Responsabilidad. Los pasivos futuros requieren un sistema integral de gestión de residuos que incorpore un enfoque de evaluación de riesgos. El objetivo es proporcionar un proceso de tratamiento con el mínimo riesgo de que los residuos generen un problema ambiental o de salud en el futuro. Así, la mejor solución sería aquella en la que los residuos se limpien, traten y dispongan de una vez por todas, es decir de manera definitiva (Getliff, J. M., Silverstone, M. P., Sharman, A. K., Lenn, M., and T. Hayes, 1998).

5. VIABILIDAD DEL USO DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN PREVIAMENTE TRATADOS, EN LA INDUSTRIA PETROLERA O EN OTRO TIPO DE INDUSTRIA APLICADO A UN CASO COLOMBIANO

Después de que se hayan considerado todas las opciones de disposición de cortes de perforación, el siguiente paso es evaluar la reutilización del material, el cual puede ser realizado en el mismo lugar donde se genera el residuo, fuera del lugar donde se genera el residuo o en otras industrias. Algunos ejemplos incluyen: el uso de cortes de perforación para la fabricación de ladrillos y material para la construcción de carreteras, el uso de gas de ventilación como combustible, la elaboración de bloques de cemento, entre otros (Owens, C.K, 1994).

Los residuos de los fondos de tanques, las emulsiones, los hidrocarburos pesados y los suelos que contienen hidrocarburos se pueden usar como aceite para carreteras, mezcla para carreteras o asfalto. Estos residuos deben ser previamente analizados para asegurarse que no sean inflamables, tengan una densidad mixta y un contenido de metales consistente con los aceites o mezclas para carreteras. La aplicación de residuos de hidrocarburos en las carreteras debe realizarse a tasas de carga que minimicen la posibilidad de generar escorrentías superficiales (Owens, C.K, 1994).

5.1. REUTILIZACIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN

Los cortes de perforación tratados tienen numerosos usos, entre los cuales están la estabilización de superficies que son más vulnerables a la erosión, como caminos y plataformas de perforación; también se pueden utilizar como agregado o relleno en la fabricación de hormigón, ladrillos o bloques. El Departamento de Energía de Estados Unidos ha investigado la posibilidad de utilizar cortes de perforación como sustrato para restaurar los humedales costeros y se han realizado algunos ensayos en el Reino Unido utilizando cortes como combustible para centrales eléctricas (THCAAdmin, 2019).

La recuperación de los cortes de perforación y los lodos de perforación suele ser práctica, rentable y además es un proceso ambientalmente sostenible. Reciclar y reutilizar los cortes puede ayudar a las empresas a ahorrar dinero en costos de disposición, reducir el tráfico de vehículos de carga y ahorrar dinero en la construcción de caminos y plataformas para la perforación de pozos petroleros.

Reciclar los cortes de perforación puede ayudar a cumplir con las normas y regulaciones de disposición final, una adecuada eliminación de dichos residuos puede evitar la contaminación de los suministros de agua y suelo. A través de este proceso, se pueden reutilizar lodos y cortes, ahorrando dinero y contribuyendo a la salud del medio ambiente (THCAAdmin, 2008).

La reutilización es considerada como una de las mejores opciones para la gestión de residuos de perforación. Antes de reutilizar los cortes, se debe asegurar que el hidrocarburo contenido, porcentaje de humedad, salinidad y contenido de arcilla de los cortes sean adecuados para el uso del material. Algunas opciones de reutilización son (M.R. Islam, M.I. Khan, 2007):

- **Material de construcción:** El reciclaje de materiales en aplicaciones de construcción muestra una tendencia global que está aumentando significativamente. Este notable crecimiento se atribuye fundamentalmente a los esfuerzos por limitar la disposición de residuos y disminuir el consumo de materias primas vírgenes en las actividades de nuevas construcciones. Los cortes de perforación se utilizan en su mayoría como componentes en la producción de mezclas como el hormigón, uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, que consume una gran cantidad de materias primas (Maziar Foroutan, Marwa M. Hassan, Natalie Desrosiers, Tyson Rupnow, 2018).

Desde la perspectiva de la construcción, los cortes tratados se han utilizado como material de relleno, materiales de cobertura en landfills o como agregado o relleno en la fabricación de hormigón, ladrillos o bloques. Otras posibles aplicaciones en construcción incluyen el uso en pavimentos de carreteras, betún y asfalto o el uso en fabricación de cemento. Los cortes también se pueden utilizar para el abandono de pozo (M.R. Islam, M.I. Khan, 2007).

Otras aplicaciones de construcción incluyen el uso en la fabricación de cemento, betún y pavimentos asfálticos. Los cortes de perforación también se reciclan para su uso como partículas a granel con materiales de construcción sólidos, como la base de carreteras para caminos y plataformas o como componente principal de mezclas que hacen estructuras de hormigón de gran tamaño, sustancialmente monolíticas, especializadas y de ingeniería civil (Maziar Foroutan, Marwa M. Hassan, Natalie Desrosiers, Tyson Rupnow, 2018).

En la mayoría de las situaciones, la reutilización o el reciclaje de residuos o subproductos es una práctica deseable. A la luz del mayor enfoque en el deber de cuidado y las consideraciones comerciales, se están buscando alternativas viables para el reciclaje y la reutilización de grandes volúmenes de cortes de los programas de perforación actuales y futuros (Maziar Foroutan, Marwa M. Hassan, Natalie Desrosiers, Tyson Rupnow, 2018).

- **En la fabricación de cemento:** El proceso de fabricación del cemento consiste en moler las materias primas como arcillas, calizas y margas, mezclarlas en determinadas proporciones y quemarlas en un gran horno rotatorio a temperaturas de hasta 1.450°C, cuando el material se sinteriza y se funde parcialmente en bolas. El material se enfría y se muele hasta obtener un polvo fino, al que se le agrega algo de yeso y el producto resultante es el cemento Portland comercial (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

La combustión conjunta de cortes de perforación en hornos de cemento se ha utilizado en el Reino Unido, Austria y Bakú. Esta opción es adecuada para cortes base aceite sin tratar con el fin de aprovechar el contenido de aceite como combustible. El cemento es un material altamente especificado y es probable que la naturaleza variable de los cortes de perforación limite el rendimiento antes de afectar la calidad del cemento (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

- **Uso en pavimentos, betún y asfalto:** Los cortes de perforación base aceite cumplen la misma función que la pavimentación de carreteras tradicional de alquitrán y astillas, de acuerdo con el contenido aceitoso los cortes se pueden utilizar como agentes anticorrosivos M.R. Islam, M.I. Khan, 2007).

Por otro lado, la producción de pavimentos bituminosos que incorporan cortes de perforación se encuentra en etapa de estudio. Esta opción de reutilización puede requerir la eliminación de aceite y/o sal y requiere un programa de pruebas para determinar la generación de lixiviados y las propiedades de desempeño del pavimento (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

Los cortes tratados, en particular el material tratado con cal, tienen potencial para su uso en varias aplicaciones en carreteras. Para las estructuras viales, la calidad, en términos de durabilidad y capacidad de carga de cada una de las capas de pavimento aumenta de abajo hacia arriba, es decir, los requisitos de especificación para cualquier capa dada son siempre más altos que los de la capa debajo de ella. Las posibilidades de utilizar cortes de perforación como reemplazo de materiales naturales disminuyen a medida que aumentan los requisitos de especificación para las capas respectivas. La barrera principal en este caso es el potencial de generación de lixiviados de sulfatos y/o cloruros de los cortes de perforación. Pueden utilizarse técnicas de tratamiento que reduzcan este riesgo para producir

material tratado adecuado para su uso. (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

- **Uso para la construcción de Landfills:** También existe la posibilidad de que el material sin tratar pueda usarse como recubrimiento de landfills o en materiales de construcción de landfills, como revestimientos de fondo, revestimientos laterales, paredes y bases estructurales y caminos. Dentro de los landfills, donde los lixiviados están contenidos y los estándares de calidad están más claros, es probable que sea más fácil para los cortes cumplir con los requisitos de rendimiento. Además, siempre que el material se retenga en el landfill y con control en la generación de lixiviados, el ente regulador puede estar más tranquilo por esta opción de reciclaje (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).
- **Uso como combustible:** Los cortes base aceite se pueden usar como combustible en plantas de energía, Los cortes que se mezclan en una proporción baja con el carbón pueden servir como fuente primaria de combustible, lo cual puede disminuir en gran medida el costo de la remediación del petróleo (M.R. Islam, M.I. Khan, 2007).

Los cortes de perforación tienen un valor térmico similar al del carbón de bajo grado. Se han seleccionado dos opciones de combustible (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003):

- a. Combustión en una central eléctrica de carbón con reciclaje de cenizas
- b. Combustión a nivel local con recuperación de calor y reciclaje beneficioso de residuos.

- **Uso en bloques de concreto y concreto premezclado:** Las altas concentraciones de cloruros limita el uso de los cortes de perforación en la elaboración de concreto reforzado, sin embargo, este tipo de residuo puede usarse en la elaboración de

concreto no reforzado. Los tipos de concretos considerados los más prometedoras a la hora de usar cortes de perforación son los bloques de concreto prefabricado y el concreto premezclado. Las principales propiedades requeridas para el concreto estructural están cubiertas en varios estándares, incluidos BS 5328, BS EN 8500 y BS EN 206 (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

Según la Norma Técnica Colombiana NTC 3459, La presencia de cloruros en el concreto, provenientes del agua, mezcla o de otras fuentes, puede causar problemas potenciales con algunos cementos o cuando se tienen metales embebidos en el concreto.

El contenido total de cloruros no debe exceder de 500 mg/l para concreto preesforzado, o de 1000 mg/l para obras de concreto reforzado en ambientes húmedos o en contacto con aluminio embebido, metales diferentes o con formaletas metálicas galvanizadas.

Por otro lado, la British Petroleum junto con la Universidad de Londres realizaron algunas pruebas para evaluar las propiedades frescas y endurecidas de mezclas de concreto elaborado con lodos y cortes base aceite.

En el trabajo experimental, se encontró que los cortes por sí solos causaban una reducción significativa de la trabajabilidad y la resistencia del concreto, pero no de manera prohibitiva. La reducción en la trabajabilidad se pudo restaurar utilizando un superplastificante y la reducción de la resistencia fue tan solo de un 20 % en el concreto.

Se obtuvieron efectos más severos y potencialmente prohibitivos sobre la trabajabilidad del concreto con la incorporación de cortes base aceite, es probable que ningún componente del lodo o corte tenga efectos nocivos a largo plazo sobre el

concreto o el acero incrustado en él, pero aún no hay datos disponibles sobre la generación de lixiviados del concreto al entorno circundante.

Es posible que se requiera la granulación como pretratamiento para que la encapsulación en concreto pueda ubicarse aguas abajo de un proyecto local de recuperación de energía si logran producir material vitrificado de un tamaño y resistencia adecuados (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

- **Uso para la fabricación de ladrillo:** Otro de los posibles usos de los cortes de perforación es en la fabricación de ladrillos, el cual consiste en tomar una cantidad adecuada de arcilla y pretratarla con el fin de convertir el agregado crudo en polvo seco, luego; se mezcla el corte de perforación seco y la arcilla en diferentes proporciones de volumen, después; se agrega un poco de agua y se revuelve la mezcla con el fin de controlar el contenido de agua el cual debe estar entre 10% y 25%, como material de lechada para ladrillo (Ta-Lin Chen;Sunlong Lin; Zsay-Shin Lin, 2007).

Luego de tener controlado el contenido de agua en la mezcla, esta se vierte en un molde el cual tiene como función darle la forma de cubo rectangular a la mezcla, lo anterior se hace con ayuda de presión la cual oscila entre (103~141kgf/cm²). Después, se coloca la muestra húmeda en un horno a 50 °C para el secado primario, después de un tiempo se mueve la muestra a un horno a 105 °C hasta el día siguiente para luego sacarlo totalmente seco y medir sus dimensiones (Ta-Lin Chen;Sunlong Lin; Zsay-Shin Lin, 2007).

El paso a seguir consiste en colocar el ladrillo en un horno de alta temperatura (850~1000 ° C) para sinterizarlo y convertirlo en el producto final del ladrillo. Por último, se deben medir nuevamente las dimensiones y determine la tasa de absorción de

agua, la tasa de contracción por calor y la resistencia a la compresión de la muestra (Ta-Lin Chen; Sunlong Lin; Zsay-Shin Lin, 2007).

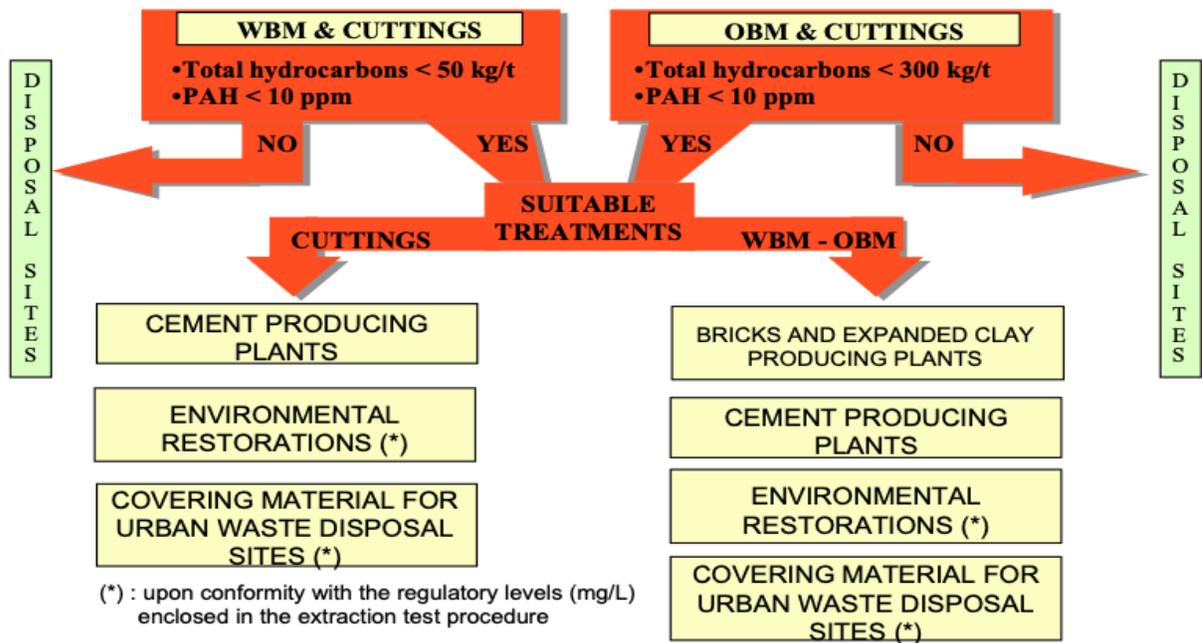
Ventajas de la reutilización de cortes. Las experiencias obtenidas hasta el momento proporcionaron resultados muy alentadores no solo desde el punto de vista del ahorro de costos sino también como una gran contribución a la mejora del impacto ambiental de la industria del petróleo, el gran aporte se derivó de (Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000):

- Reducción de la duración de la operación.
- Menor volumen de generación de residuos.
- Descarga nula o mínima de residuos de perforación.
- Residuos como materias primas para su reutilización.

Experiencias de reutilización de cortes. Las experiencias descritas son de particular interés ya que reutilizan cortes de perforación como materia prima evitando así la disposición final del material, ofreciendo la posibilidad de reducir significativamente el impacto ambiental de los residuos sólidos generados durante las actividades de perforación en Italia. La **figura 16**, presenta las cuatro alternativas que contemplan para el manejo y reutilización de los cortes de perforación.

- En plantas productoras de cemento
- En plantas productoras de ladrillos.
- Para restauraciones ambientales.
- Materiales de cobertura para la eliminación de residuos urbanos.

Figura 16. Diagrama de flujo de las alternativas de reutilización de residuos.



Fuente: Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000.

Los residuos se pueden reutilizar cuando se cumplen las siguientes especificaciones.

- Lodos y cortes base agua: hidrocarburos totales < 50 kg/t y PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos) < 10 ppm.
- Lodos y cortes base aceite: hidrocarburos totales < 300 kg/t y PAH (hidrocarburo aromático policíclico) < 10 ppm.

De acuerdo con la ley italiana, Ley Ronch publicada en 1997, los residuos reutilizados en restauraciones ambientales y en material de cobertura no solo sufren limitaciones hidrocarburos totales y aromáticos, sino que también deben cumplir con los niveles reglamentarios de la prueba de generación de lixiviados. Las estrictas normas de disposición final de residuos complican los procesos de tratamiento y también afectaran

negativamente a la economía dificultando en gran medida estas dos opciones de reutilización de cortes (Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000).

Por otro lado, se implementa la reutilización de cortes de perforación de dos campos petroleros en Italia. En la práctica, los residuos una vez alcanzaban las especificaciones de hidrocarburos totales y aromáticos, podían ser directamente reutilizados como materia prima en plantas productoras de cemento o de ladrillos sin necesidad de realizar pruebas de generaciones de lixiviados (Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000).

En la isla de Sicilia, los cortes producidos después de su tratamiento se transportaban a una planta productora de cemento. Allí, de acuerdo con la composición y el proceso de fabricación del cemento, alrededor del 3-5 % de los cortes de perforación se mezclaban con las materias primas como calcáreas y arcillosas, para producir cemento Portland (Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000).

La operación de perforación de Agip produjo alrededor de 50.000 toneladas de cortes, de los cuales el 10 % se reutilizó y el 90 % se dispuso en un sitio de disposición de segunda categoría según regulación Italiana. Los beneficios económicos de la reutilización del 10 % de los cortes que se reutilizaron se pudo evidenciar al alcanzar hasta un 40 % de ahorro en los costos respecto a la disposición en Landfills. Los resultados de la reutilización de residuos han brindado aspectos positivos y han alentado beneficios económicos para las compañías que deciden implementar esta práctica en su sistema de gestión de residuos. (Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000).

Como conclusiones finales se puede mencionar que la reducción positiva de los impactos ambientales se atribuye a una menor duración de la operación, menos generación de residuos, componentes de lodo "verdes", menor cantidad de consumo de

materiales, métodos mejorados de gestión de residuos y más importante, políticas de reutilización de residuos (Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao, 2000).

5.2. IDENTIFICACIÓN DE OPCIONES PARA EL RECICLAJE DE CORTES DE PERFORACIÓN.

En primer lugar, se deben revisar las posibles opciones de disposición final y reutilización de cortes de perforación y realizar un listado de las posibles opciones agrupadas por categorías como se muestra a continuación (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003):

- Dilución con materiales contaminados.
- Combustible
- Aditivos
- Agricultura/paisajismo
- Productos de asfalto/betún
- Productos de hormigón/cemento
- Ingeniería hidráulica
- Agregados
- Lechadas
- Productos de consumo

Criterios de evaluación. Se deben considerar las ventajas y desventajas de cada opción frente a los criterios generales de evaluación de impacto ambiental, consideraciones técnicas, factibilidad comercial, logística y responsabilidad del producto como se muestra en el **Cuadro 23**. (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

Cuadro 23. Criterios de evaluación

Criterio	Análisis
Impactos Ambientales	Exposición humana. Consumo neto de energía Emisiones de proceso. Emisiones de uso final. El destino del final de la vida.
Consideraciones Técnicas	Etapa de desarrollo. Especificaciones. Requiere remoción de aceite. Eliminación de sales requerida. Granulación requerida.
Viabilidad Comercial	Demanda. Suministro competitivo. Aceptabilidad del mercado. Influencia de la industria del petróleo y el gas Costo al mercado. Valor del producto.
Logística	Dificultad de manejo. Distancia para reciclar. Pasos en la cadena de suministro. requisito de almacenamiento.
Responsabilidad y Licencias	Complejidad de licencias. Responsabilidad del producto.

Fuente: (Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle, 2003).

Cabe señalar que algunas de las opciones descartadas en el proceso de selección podrían resultar viables dependiendo del nivel de inversión y esfuerzo realizado para superar las preocupaciones ambientales y estimular la demanda comercial que se tenga.

Metodología. A continuación, se propone una metodología general que puede adaptarse a cualquier caso de estudio de acuerdo a la información y requerimientos con el fin de evaluar la reutilización de cortes de perforación teniendo en cuenta los criterios nacionales e internacionales según la normativa legal vigente.

Todos los cortes y fluidos base aceite de los tanques y de las piscinas de almacenamiento que no puedan ser tratados y dispuestos en el lugar de la generación deben recogerse y enviarse a una planta de reciclaje o un lugar de disposición aprobado para dicho fin.

- ✓ **Definir el contenido de aceite y metales.** Se deben realizar pruebas de laboratorio con el fin de determinar si el material tratado cumple con los criterios definidos en el Protocolo Louisiana 29-b con el fin de determinar el impacto ambiental que genere la reutilización de dicho material.
- ✓ **Realizar pruebas de lixiviación.** Una vez finalizado el tratamiento de los cortes de perforación se deben realizar pruebas de laboratorio con el fin de determinar si el residuo cumple con los parámetros de lixiviación relacionados en el **Cuadro 10**, los cuales determinan si el residuo es peligroso y tóxico.
- ✓ **Definir la calidad del aire.** Tiene como propósito prevenir los efectos adversos para la salud humana y los daños a la vegetación, la fauna y la flora. Estas normas se encuentran relacionadas en la **Cuadro 13**.
- ✓ **Definir la Reutilización más adecuada.** Por último, se deben identificar las opciones de reutilización de acuerdo a las características del material después del tratamiento.

5.3. NORMATIVA PARA LA REUTILIZACION DE CORTES DE PERFORACIÓN

5.3.1. Consideraciones de Cumplimiento Normativo

Todas las regulaciones y permisos federales, estatales y locales aplicables deben determinarse para cada opción de reutilización de cortes debido a que las regulaciones y normas pueden afectar cada opción de manera diferente. Se deben proporcionar estimaciones de factibilidad para cada opción en función de los requisitos de cumplimiento normativo, el momento de aprobación del permiso y las prioridades de la agencia reguladora (Longwell, H.J., Grieve, D.V., A.K. Raque, 1993).

Los requisitos normativos básicos para los cortes de perforación son sencillos. Los cortes se clasifican como residuos de perforación y deben gestionarse como residuos sólidos. En Alaska, por ejemplo, los cortes pueden ser reinyectados en un pozo autorizado o dispuestos en un vertedero autorizado. Las regulaciones de residuos sólidos de Alaska brindan flexibilidad para remover los residuos sólidos, minimizando de esta forma la cantidad de residuos que necesitan disposición. Para reducir los cortes de perforación que requieren disposición, se deben cumplir los siguientes tres objetivos (Susich, Mark L., and Max W. Schwenne, 2004):

- Los cortes deben ser tratados con el propósito de separar el material potencialmente peligroso del no peligroso,
- Se debe disponer el componente peligroso.
- Demostrar que los residuos no representan ninguna amenaza para el medio ambiente.

5.4. APLICACIÓN A UN CASO COLOMBIANO

Una empresa de servicios maneja el tratamiento y la disposición final de cortes de perforación base agua y cuenta con terrazas clausuradas de cortes de perforación base agua y con una capacidad de almacenamiento cada vez más reducida, a medida que aumentan las campañas de perforación en la zona.

Para el desarrollo de esta investigación se tuvieron en cuenta el Decreto 4741 de 2005 el cual tiene por objeto prevenir y regular la generación de residuos peligrosos generados en el marco de la gestión integral en Colombia y el Protocolo Louisiana 29-b como normativa extranjera y como modelo de aplicación a la legislación colombiana.

A continuación, se presenta la metodología propuesta ajustada al caso de estudio de acuerdo con la información suministrada; con el fin, de determinar la mejor opción para reutilizar los cortes de perforación en estudio con el fin de contemplar otro tipo de usos diferentes a la disposición final actual.

- ✓ **Definir el contenido de aceite y metales.** En el **Cuadro 24** se presentan los resultados del análisis de suelos realizado al material con el fin de determinar el contenido de aceite y metales presente en la muestra. Por otro lado, en el **Cuadro 25**, se compara la composición del material con el Protocolo Louisiana 29-b con el propósito de identificar si el residuo cumple con los parámetros establecidos en el protocolo y de esta forma poderlo contemplar como material para poder ser reutilizado.

Cuadro 24. Análisis de suelos

Parámetro	Unidad	Valor
Arsénico Total	mg/kg ss	< 0,500
Bario Total (Ba)	mg Ba/kg ss	2082
Cadmio Total	mg/kg ss	<0,2
Compuestos Orgánicos Volátiles VOCs 1	mg/kg	<0,75
Conductividad Eléctrica	mmhos/cm	0,239
Cromo Total	mg/kg ss	< 20,0

Grasas y Aceites	%	<0,0100
Hidrocarburos	%	<0,0100
Humedad Natural	%	0,557
Mercurio Total	mg/kg ss	<0,200
pH	Unidades de pH	7,90
Plaguicidas Organoclorados	mg/kg ss	<0,00133
Plaguicidas Organofosforados	mg/kg ss	<0,04
Plata Total	mg/kg ss	<10,0
Plomo Total	mg/kg ss	23,3
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	%	<2.85
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)	Sin Und	0,285
Selenio Total	mg/kg ss	<0,500
Zinc Total	mg/kg ss	47,1

Fuente: Autor

Cuadro 25. Comparación frente a Protocolo Louisiana 29-b

Parámetro	Unidad	Valor	Louisiana 29-b
Arsénico Total	mg/kg ss	< 0,500	10
Bario Total (Ba)	mg Ba/kg ss	2082	20000
Cadmio Total	mg/kg ss	<0,2	10
Compuestos Orgánicos Volátiles VOCs 1	mg/kg	<0,75	-
Conductividad Eléctrica	mmhos/cm	0,239	<4

Cromo Total	mg/kg ss	< 20,0	500
Grasas y Aceites	%	<0,0100	1
Hidrocarburos	%	<0,0100	-
Humedad Natural	%	0,557	50
Mercurio Total	mg/kg ss	<0,200	10
pH	Unidades de pH	7,90	6-9
Plaguicidas Organoclorados	mg/kg ss	<0,00133	-
Plaguicidas Organofosforados	mg/kg ss	<0,04	-
Plata Total	mg/kg ss	<10,0	200
Plomo Total	mg/kg ss	23,3	500
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	%	<2.85	15
RAS (Relación de Adsorción de Sodio)	Sin Und	0,285	12
Selenio Total	mg/kg ss	<0,500	10
Zinc Total	mg/kg ss	47,1	500

Fuente: Autor.

- ✓ **Realizar pruebas de lixiviación.** En el **Cuadro 26**, se presentan los resultados del análisis de lixiviados con el fin de determinar si el material es peligroso y toxico. En el **Cuadro 27**, se compara la composición del material con el Decreto 4741 de 2005 con el propósito de identificar si el residuo cumple con los parámetros establecidos en el Decreto y de esta forma poderlo contemplar como material para poder ser reutilizado.

Cuadro 26. Análisis de lixiviados

parámetro	Unidad	Valor
cloruros	mg/l	<10,0
Cromo Hexavalente Disuelto	mg Cr6+/L	<0,050
CLP-Arsénico	mg As/L	<0,00250
TCLP-Bario	mg Ba/L	1,61
TCLP-Cadmio	mg Cd/L	<0,0100
TCLP-Cromo	mg Cr/L	<0,100
TCLP-Mercurio	mg Hg/L	<0,00100
TCLP-Níquel	mg Ni/L	<0,200
TCLP-Plata	mg Ag/L	<0,0500
TCLP-Plomo	mg Pb/L	<0,100
TCLP-Selenio	mg /L	<0,00250
TCLP-Zinc	mg Zn/L	<0,0500

Fuente: Autor.

Cuadro 27. Comparación frente a Decreto 4741 de 2005

Parámetro	Unidad	Valor	Decreto 4741 de 2005
Cloruros	mg/L	<10,0	-
Cromo Hexavalente Disuelto	mg Cr6+/L	<0,050	-
CLP-Arsénico	mg As/L	<0,00250	5,0
TCLP-Bario	mg Ba/L	1,61	100
TCLP-Cadmio	mg Cd/L	<0,0100	1,00
TCLP-Cromo	mg Cr/L	<0,100	5,00
TCLP-Mercurio	mg Hg/L	<0,00100	0,200

TCLP-Níquel	mg Ni/L	<0,200	-
TCLP-Plata	mg Ag/L	<0,0500	5,00
TCLP-Plomo	mg Pb/L	<0,100	5,00
TCLP-Selenio	mg /L	<0,00250	1,00
TCLP-Zinc	mg Zn/L	<0,0500	-

Fuente: Autor.

Análisis de resultados. Según el **Cuadro 25**, la muestra analizada en este caso se clasifica como un corte base agua teniendo en cuenta que el porcentaje de grasas y aceites presente en el corte es inferior al 1%, lo cual supone que la muestra no genera ningún impacto negativo sobre el medio ambiente. Adicional a esto, se evidencia que la concentración de Arsénico presente en la muestra, además de cumplir con la legislación propuesta, es baja teniendo en cuenta que es uno de los elementos tóxicos más frecuentes en el medio ambiente impactando de forma negativa las aguas subterráneas.

Los compuestos del Bario tienen importantes usos, un ejemplo muy claro es el compuesto comúnmente llamado barita, que se ha utilizado como agente densificante en fluidos de perforación, el cual ha sido preferido sobre otros materiales debido a su alta densidad, bajos costos de producción, baja abrasividad y facilidad de manejo. A partir del **Cuadro 25 Y 27**, se puede evidenciar que el valor que arroja el análisis de laboratorio cumple con lo estipulado en las legislaciones propuestas, sin embargo, se deben hacer pruebas más específicas para determinar si la muestra que se está estudiando cumple para reutilizarse como un fluido de perforación.

En cuanto a la conductividad eléctrica se debe tener en cuenta que, si el valor es superior a 4 mmhos/cm, la muestra analizada se clasifica como salina y por ende perjudicial para el medio ambiente y al momento de reutilizar el corte base agua posiblemente se vea afectado el ecosistema. Por el contrario, si el valor de conductividad es inferior a 4 mmhos/cm, la muestra analizada se clasifica como sódica.

A partir de la información suministrada en el **Cuadro 25**, se puede inferir que la muestra es sódica lo cual indica que no tiene muchas afectaciones al medio ambiente, además cumple con lo establecido en Louisiana 29-b.

Por otro lado, se puede inferir que el corte es alcalino debido a que el pH de la muestra es mayor a 7,0 lo cual indica que puede ser arcillosos y tener baja capacidad de infiltración, sin embargo, los valores de pH que oscilan entre 8 y 13 son buenos para prevenir la corrosión en tuberías y mantener las propiedades reológicas del lodo de perforación.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede determinar que la muestra analizada cumple con los parámetros establecidos en el Decreto 4741 de 2005 y el Protocolo Louisiana 29-b, ya que los resultados que arroja el análisis se encuentran dentro de los límites estipulados en la norma.

6. CONCLUSIONES

- El proceso de perforación de pozos de petróleo y gas genera una gran variedad de desechos. Algunos de estos desechos son subproductos naturales de la perforación a través de la tierra y algunos provienen de materiales utilizados para perforar pozos, desechos que pueden ser reutilizados en la industria del petróleo o en otro tipo de industria.
- Se analizó la normativa actual de disposición final de cortes de perforación en Colombia y se comparó con la internacional evidenciando que la normativa estadounidense Louisiana 29-b es pionera a nivel mundial en la reglamentación de todas las actividades industriales que afecten el medio ambiente, es por esto, que la autoridad nacional de licencias ambientales junto a la empresa estatal de hidrocarburos en Colombia, decidieron adoptarla, con el propósito de controlar de forma más estricta y organizada los residuos producidos en la industria petróleo.
- Se revisaron las diferentes alternativas para la disposición final de cortes de perforación base agua y se determinó que el entierro en sitio es la técnica más común utilizada en especial el landfill ya que se ha convertido en una importante estrategia de gestión de residuos en todo el mundo, la cual sigue siendo la más importante, sensata y menos costosa estrategia de disposición de final de residuos.
- En el caso de estudio presentado en esta Monografía, se evidenció que el corte de perforación base agua analizado cumple con los parámetros establecidos en el Decreto 4741 de 2005 y Louisiana 29-b, por tal razón, el material se clasifica como un residuo no tóxico y no peligroso para el medio ambiente, por lo cual, se puede considerar para reutilizarlo en la industria del petróleo o en otro tipo de industria.

- Se evidencio que la información que arrojó el análisis de laboratorio, realizado al material de estudio, no proporcionó suficientes criterios para determinar con exactitud la mejor opción de reutilización del residuos, a pesar de que el material cumple con los parámetros establecidos en la normativa Colombiana e internaciones, requiere de análisis muchos más específicos como resistencia, durabilidad, compactación, compresión, ciclos de humedecencia – secado, entre otros, para determinar su aplicabilidad.

7. RECOMENDACIONES

- La normatividad en Colombia debería incluir dentro de la definición de residuo peligroso, la clasificación de residuo inflamable, corrosivo, reactivo o tóxico y verificar los niveles, así como se describió en el capítulo 2 de esta tesis, conforme a la normatividad vigente en Estados Unidos.
- Se deben realizar análisis mucho más específicos y detallados de acuerdo al uso que se le quiera dar al material (desecho), por ejemplo, para la construcción de vías se recomiendan hacer estudios de resistencia, durabilidad, compactación, compresión y ciclos de humedecencia - secado del material.
- Se recomienda complementar el estudio, presentado en esta tesis, con una propuesta económica con fin de determinar la viabilidad del proyecto según la opción más adecuada para reutilizar los cortes de perforación y compararla con el proceso de disposición actual.

BIBLIOGRAFIA

Abu Khamsin, S. A. "Environmental Regulations for Drilling Operations in Saudi Arabia." Paper presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference, Bahrain, November 1997. doi: <https://doi.org/10.2118/39256-MS>

ASME Shale Shaker Committee. (2005). Drilling Fluids Processing Handbook - 16.6.1 Dewatering. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003S45P2/drilling-fluids-processing/dewatering>

Asociación Colombiana del Petróleo ACP - ACP [página web]. Disponible en Internet: <<https://acp.com.co/web2017/es/guias/142-guia-ambiental-perforacion-2009/file>>.

Bansal, K. M., and _ Sugiarto. "Exploration and Production Operations - Waste Management a Comparative Overview: US and Indonesia Cases." Paper presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 1999. doi: <https://doi.org/10.2118/54345-MS>

BC Oil and Gas Commission [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.bcoqc.ca/files/operations-documentation/Oil-and-Gas-Operations-Manual/Supporting-Documents/drilling-waste-management-chapter-release.pdf>>.

CABOT, Rondine. AER Drilling Waste Requirements. En: Alberta Energy Regulator. 2, febrero, 2014.

Caenn, Ryen Darley, H.C.H. Gray, George R.. (2017). Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (7th Edition). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCPDCFE12/compositionproperties/composition-properties>

Chen, Ta-Lin, Lin, Sunlong, and Zsay-Shin Lin. "An Innovative Utilization of Drilling Wastes as Building Materials." Paper presented at the E&P Environmental and Safety Conference, Galveston, Texas, U.S.A., March 2007. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/106913-MS>

Clements, Kayli , Veil, John A., and Arthur J. Leuterman. "Global Practices and Regulations for Land application and Disposal of Drill Cuttings and Fluids." Paper presented at the SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, April 2010. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/126565-MS>

CUTTINGS [Anónimo]. The Schlumberger Energy Glossary | Energy Glossary [página web]. [Consultado el 9, julio, 2022]. Disponible en Internet: <https://glossary.slb.com/es/terms/c/cuttings>.

DANESHFAR, Mohamad Amin y ARDJMAND, Mehdi. A new approach in the optimal site selection of landfills for drilling cuttings from petroleum and gas fields. En: Chemosphere [en línea]. Mayo, 2021. vol. 270 [consultado el 8, febrero, 2023], p. 129402. Disponible en Internet: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129402>. ISSN 0045-6535.

DECRETO 4741 de 2005 - Gestor Normativo [Anónimo]. Inicio - Función Pública [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>>.

DECRETO 838 de 2005 - Gestor Normativo [Anónimo]. Inicio - Función Pública [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16123>>.

Department of Natural Resources). DEPARTMENT OF Natural Resources | State of Louisiana [Anónimo]. Department of Natural Resources | State of Louisiana [página web]. [Consultado el 17, febrero, 2023]. Disponible en Internet: <<http://www.dnr.louisiana.gov/index.cfm/page/9>>.

Djuric, Ana "Land-Based Disposal Rules and Regulations: How Three Different High-Performance Fluids Rate in Three Different Regions." Paper presented at the International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Perth, Australia, September 2012. doi: <https://doi.org/10.2118/157567-MS>

Djuric, Ana "Land-Based Disposal Rules and Regulations: How Three Different High-Performance Fluids Rate in Three Different Regions." Paper presented at the International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Perth, Australia, September 2012. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/157567-MS>

DRILLING WASTE Management and Control The Effects 2090 4568 1000166 | PDF | Waste Management | Waste [Anónimo]. Scribd [página web]. Disponible en Internet: <<https://es.scribd.com/document/435853482/Drilling-Waste-Management-and-Control-the-Effects-2090-4568-1000166>>.

DRILLING WASTE Management Technology 1 PDF | PDF | Casing (Borehole) | Waste [Anónimo]. Scribd [página web]. Disponible en Internet: <<https://es.scribd.com/document/331499350/Drilling-Waste-Management-Technology-1-pdf>>.

DRILLING WASTE Management Technology Review | PDF | Casing (Borehole) | Drilling Rig [Anónimo]. Scribd [página web]. Disponible en Internet: <<https://es.scribd.com/document/456666592/Drilling-waste-management-technology-review>>.

ENERGY RESOURCES Conservation Board | The Canadian Encyclopedia [Anónimo]. Home | The Canadian Encyclopedia [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/energy-resources-conservation-board>>.

Engineering Handbook - Sustainable Operations. Gulf Publishing Company. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEHSO008/petroleumengineering/petroleum-engineering>

ESPINOZA, Andrés y QUIROGA, Karen. Desarrollo de un proceso para el acondicionamiento de los cortes de perforación como fertilizante de un campo petrolero. Bogotá. 2013. p.44

ETHW. (2021, 13 de agosto). Spring Poles. https://ethw.org/Spring_Poles

Farinato, Ray, Masias, Henry M., Garcia, Diana, Bingham, Richard, and Glenn David Antle. "Separation and Recycling of Used Oil-Based Drilling Fluids." Paper presented at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, December 2009. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2523/IPTC-13238-MS>

Ferrari, G., Cecconi, F., and L. Xiao. "Drilling Wastes Treatment and Management Practices for Reducing Impact on HSE: ENI/Agip Experiences." Paper presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, November 2000. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/64635-MS>

FILE:KAMATH1W2 FIG7.PNG - Enviro Wiki [Anónimo]. Enviro Wiki [página web]. [Consultado el 24, enero, 2023]. Disponible en Internet: <https://www.enviro.wiki/index.php?title=File:Kamath1w2_Fig7.PNG>.

Fink, Johannes. (2021). Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids (3rd Edition) - 20.3.1 Environmental Impact. (pp. 885). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012K1OIC/petroleum-engineers-guide/environmental-impact>

Getliff, J. M., Silverstone, M. P., Sharman, A. K., Lenn, M., and T. Hayes. "Waste Management and Disposal of Cuttings and Drilling Fluid Waste Resulting from the Drilling and Completion of Wells to Produce Orinoco Very Heavy Oil in Eastern Venezuela." Paper presented at the SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Caracas, Venezuela, June 1998. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/46600-MS>

Gray, George R. Darley, H.C.H.. (1980). *Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids* (4th Edition). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCPOWDFE4/composition-properties/composition-properties>

Islam, M. Rafiqul Hossain, M. Enamul. (2021). *Drilling Engineering Towards Achieving Total Sustainability*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDETATS01/drillingengineering/drilling-engineering>.

Jones, F.V., and A.J.J. Leuterman. "Alternate Environmental Testing of Drilling Fluids: An International Perspective." Paper presented at the European Petroleum Conference, The Hague, Netherlands, October 1990. doi: <https://doi.org/10.2118/20889-MS>

Khan, M.I. Islam, M.R.. (2007). *Petroleum Engineering Handbook - Sustainable Operations*. Gulf Publishing Company. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEHSO008/petroleum-engineering/petroleum-engineering>

LANDFILL CONSTRUCTION | American Foundry Society [Anónimo]. Home | American Foundry Society [página web]. Disponible en Internet: <<https://www.afsinc.org/landfill-construction>>.

Lilian, Simiyu E., Esther, Mburu , and Rukunga Allan. "Drill Cuttings and Fluid Disposal; A Kenyan Case Study." Paper presented at the SPE/AAPG Africa Energy and Technology Conference, Nairobi City, Kenya, December 2016. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/AFRC-2580389-MS>

Longwell, H.J., Grieve, D.V., and A.K. Raque. "Economic and Environmentally Beneficial Reuse of Drilling Waste." Paper presented at the SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, Texas, March 1993. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/25929-MS>

Luppens, James A. Wilson, Stephen E. Stanton, Ronald W.. (1992). Manual on Drilling, Sampling, and Analysis of Coal: (MNL11) - 3.2 Drill Core. (pp. 18). ASTM International. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004FQ4R1/manual-drilling-sampling/drill-core>

Nesbitt, Brian. (2007). Handbook of Valves and Actuators - Valves Manual International - 2.2.5 Produced Water. (pp. 57). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007XSH85/handbook-valves-actuators/produced-water>

ONWUKW, S. I. y NWAKAUDU, M. S. Drilling wastes generation and management approach. En: International Journal of Environmental Science and Development. 3, junio, 2012. vol. 3, no. 3.

Open Government Program | Alberta.ca [página web]. Disponible en Internet: <<https://open.alberta.ca/dataset/9cedb602-962c-42a7-9f68-ac3c42912004/resource/69f41c2a-1b9f-4ab1-8976-ff7805f4125a/download/2012-drillingwaste-reclamationcertification.pdf>>.

Owens, C.K. "Exploration and Production Waste Management Guidelines From the E & P Forum." Paper presented at the SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference, Jakarta, Indonesia, January 1994. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/27153-MS>

Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle. "Options for the Recycling of Drill Cuttings." Paper presented at the SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, Texas, March 2003. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/80583-MS>

Page, Paul W., Greaves, Chris, Lawson, Rosey, Hayes, Sean, and Fergus Boyle. "Options for the Recycling of Drill Cuttings." Paper presented at the SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, Texas, March 2003. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/80583-MS>

Priatna, R., Sjahroezah, A., and R. I. Bledoeg. "Waste Management: An Approach to the Management of Drilling Waste." Paper presented at the SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Stavanger, Norway, June 2000. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/61249-MS>

Raymond, Martin S. Leffler, William L.. (2017). Oil & Gas Production in Nontechnical Language (2nd Edition) - 5.1 The Spring Pole. PennWell. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0129DQB4/oil-gas-production-in/the-spring-pole>.

Razmgir, Seyed Mohsen, Afsari, Meisam , and Mahmud Amani. "Drilling Waste Management: A Case Study of the Drilling Waste Management and Environmental Control in one of the Iranian Offshore Fields." Paper presented at the SPE Middle East Unconventional Gas Conference and Exhibition, Muscat, Oman, January 2011.

Rizvi, Syed Q. A.. (2021). Surfactants and Detergents - Chemistry and Applications. ASTM International. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSDCA0001/surfactants-detergents/surfactants-detergents>

SASKATCHEWAN DRILLING Waste Management Guidelines [Anónimo]. En: Saskatchewan Ministry of Energy and Resources. 1, diciembre, 1984. Information Guideline GL 99-01.

THE PETROLEUM Engineering Handbook: Sustainable Operations: Sustainable Operations [Anónimo]. Scribd [página web]. Disponible en Internet:

<https://es.scribd.com/read/282648995/The-Petroleum-Engineering-Handbook-Sustainable-Operations-Sustainable-Operations>>.

Veil, John A. "Drilling Waste Management: Past, Present, and Future." Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September 2002. doi: <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.2118/77388-MS>

Wines, Thomas H. Mokhatab, Saeid. (2022). Contamination Control in the Natural Gas Industry - 7.3.5 Produced Water Treatment. (pp. 237). Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012RWKQ3/contamination-control/produced-water-treatment>

Zarandas vibratorias de alta calidad y sistemas de fluidos de Perforación [página web]. [Consultado el 2, diciembre, 2022]. Disponible en Internet: <https://es.brightwaysolids.com>.