

**COMPARACIÓN TÉCNICA DEL MÉTODO ENDRILL CON LOS MÉTODOS
CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN**

**CYNDY ARGOTE SIERRA
JAIR ALEXANDER MARTINEZ DE LA HOZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2011

**COMPARACIÓN TÉCNICA DEL MÉTODO ENDRILL CON LOS MÉTODOS
CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN**

**CYNDY ARGOTE SIERRA
JAIR ALEXANDER MARTINEZ DE LA HOZ**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
de Petróleos**

**ING. EDELBERTO HERNANDEZ TREJOS
DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios porque en mi camino cerro algunas puertas pequeñas para que se abriesen otras más grandes, porque si no hubiese sido su voluntad nada de esto habría sido posible. Mamá eres el mejor regalo que me dio la vida, por tí soy lo soy y he logrado ser, a tí dedico este gran logro porque con el mayor esfuerzo posible lograste hacer de mí una mejor persona, a carito mi hermanita linda que me ha apoyado en todo lo que he necesitado y siempre me ha brindado sus consejos. Papá a tí también te dedico este gran logro porque se lo orgulloso que te sientes de lo que logré.

A Jair Martínez porque más que mi novio es mi amigo aquel ángel que llegó a mí cuando más lo necesitaba, gracias por acompañarme en esta etapa, porque juntos logramos esto. Te amo mi Cosito.

Doña Rosita, Doña Julia, Señor José, Jeimy y Beto porque ustedes se convirtieron en mi segunda familia, porque aún quedan personitas que te extienden la mano cuando más lo necesitas, siempre los llevaré en mi corazón y estaré eternamente agradecida.

A mi amigo Leal, que es como ese hermano que nunca tuve, gracias porque fuiste mi guía a lo largo de este camino, porque a pesar de que algunas personas se fueron y otras llegaron tu siempre estuviste ahí.

A nuestro director de proyecto el Ingeniero Edelberto por apoyarnos y guiarnos en este proyecto. A todas aquellas personitas que aportaron algo positivo a mi vida, esos compañeros de la u que nunca olvidarás a Emilio Gil, David Montes, Diana Figueroa, Luis fdo. Rodríguez, Robinson Mancilla, Neny mejía, Henry mesa, Erika Acevedo, Gury y aquellos nombres que tal vez no mencione pero que forman parte de mi grupo de amigos.

CYNDY ARGOTE SIERRA

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO A DIOS POR GUIARME EN TODO MOMENTO, A MI FAMILIA POR TODO SU APOYO INCONDICIONAL Y A MI NOVIA CYNDY ARGOTE SIERRA POR TODO EL ESFUERZO REALIZADO PARA QUE ESTE PROYECTO PUDIERA SER REALIZADO CON ÉXITO.

JAIR ALEXANDER MARTINEZ DE LA HOZ.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	19
1. GENERALIDADES	21
1.1 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION	21
1.2 TIPOS BÁSICOS DE LODOS DE PERFORACIÓN	22
1.2.1 Lodos de perforación en base agua	23
1.2.2. Lodos de perforación en base aceite	23
1.2.3 Lodos de perforación a base de aire o gas	24
1.3 SÓLIDOS DE PERFORACIÓN	24
1.3.1 Clasificación de los desechos sólidos según el lodo empleado	25
1.3.1.1 Desechos contaminados con lodos base agua.	25
1.3.1.2 Desechos contaminados con lodos base aceite.	25
1.4 MANEJO DE SÓLIDOS DE PERFORACIÓN	26
1.4.1 Equipo de circulación del fluido de perforación	26
1.5 CONTROL DE SÓLIDOS	28
1.5.1 Objetivos de control de sólidos	29
1.5.2 Equipo de control de sólidos	30
1.5.2.1 Zarandas vibratorias (Shaleshakers).	30
1.5.2.2 Hidrociclones.	31
1.5.2.3 Desarenadores (Desanders).	32
1.5.2.4 Deslimadores (Desilters).	33
1.5.2.5 Limpiadores de lodo (Mudcleaners).	34
1.5.2.6 Centrifugas.	36
1.5.2.7 Deshidratación (Dewatering).	37

2. TÉCNICAS PARA TRATAMIENTO DE SOLIDOS DE PERFORACIÓN	39
2.1 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS O TECNICAS DE BIOTRATAMIENTO	40
2.1.1 Biodegradación Pasiva	41
2.1.2 Bioventilación (Bioventing)	42
2.1.3 Biodegradación in-situ	43
2.1.4 Biopilas	43
2.1.4.1 Ventajas de las biopilas	45
2.1.4.2 Limitaciones	45
2.1.5 Landfarming	46
2.1.6 Biodegradación en suspensión	48
2.2 DISEÑO Y APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOTRATAMIENTO	48
2.2.1. Fase de investigación y caracterización	49
2.2.2. Análisis y elección de las medidas biocorrectivas	50
2.2.3. Diseño y evaluación del sistema	51
2.2.4. Control y seguimiento	51
2.2.5. Análisis e interpretación de resultados	52
2.3 TRATAMIENTOS FISICOS	52
2.3.1 Ventilación de suelos	53
2.3.2 Flushing	53
2.3.3 Lavado de suelos	54
2.3.4 Aglomeración con alquitrán de carbón	55
2.4 TRATAMIENTOS QUIMICOS	55
2.4.1 Extracción con solventes	55
2.4.2 Degradación química	56
2.5 TRATAMIENTOS TÉRMICOS	57
2.5.1 Calentamiento con Radiofrecuencia	57
2.5.2 Vitrificación	58
2.5.3 Desorción Térmica	59
2.6 OTROS TRATAMIENTOS	59
2.6.1 Estabilización/Solidificación	59

2.6.2 Microencapsulación	60
2.6.3 Capping	60
2.6.4 Microconfinamiento	60
2.6.5 Landfilling	61
3. SISTEMAS TRADICIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN APLICADOS EN LA INDUSTRIA	62
3.1 ALMACENAMIENTO TEMPORAL	62
3.2 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL	63
3.2.1 Confinamiento en piscinas y celdas	63
3.2.1.1 Metodología	65
3.2.1.2 Equipo necesario	66
3.2.1.3 Ventajas del método	67
3.2.1.4 Desventajas.	67
3.2.2 Desorción Térmica	67
3.2.2.1 Metodología.	69
3.2.2.2 Parámetros de operación.	69
3.2.2.2.1 Post tratamiento para el uso de la tierra.	70
3.2.2.2.2 Post tratamiento para el uso del petróleo.	70
3.2.2.3 Ventajas	70
3.2.2.4 Desventajas	71
3.2.3 Incineración controlada de ripios de perforación	71
3.2.3.1 Características básicas del equipo de incineración y sistema de tratamiento de gases.	72
3.2.3.2 Metodología.	73
3.2.3.3 Ventajas	74
3.2.3.4 Desventajas	74
3.2.4 Solidificación/Estabilización de cortes de perforación	74
3.2.4.1 Ventajas	75
3.2.4.2 Desventajas.	75

3.2.5 Estabilización de cortes con cal viva	76
3.2.5.1 Metodología.	76
3.2.5.2 Sistemas de mezclado.	76
3.2.5.3 Parámetros de calidad para la cal viva.	78
3.2.5.4 Proporciones de mezcla.	79
4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN NO CONVENCIONALES APLICADOS A LA INDUSTRIA	81
4.1 REINYECCIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN (CUTTING RE-INJECTIONS) CRI	81
4.1.1 Selección de zonas	84
4.1.2 Simulaciones numéricas	84
4.1.3 Análisis de las condiciones del pozo	85
4.1.4 Identificación y mitigación de riesgos	85
4.1.5 Recomendaciones operativas	86
4.1.6 Programa piloto de inyección	87
4.1.7 Recomendaciones de monitoreo	88
4.2 TRATAMIENTO POR MICROONDAS DE CORTES DE PERFORACIÓN CONTAMINADO CON PETRÓLEO	89
4.2.1 ¿En qué consiste esta tecnología?	90
4.2.2 Metodología experimental	91
4.2.3 Efectos del tipo de material y contenido de agua	93
4.2.4 Contenido de aceite residual	94
4.2.5 Para resaltar	94
4.3 VERMICOMPOSTAJE	94
4.3.1 ¿De qué se trata?	95
4.3.2 Resultados	96
4.4 EXTRACCIÓN SUPERCRITICA DE CO ₂ APLICADO A CORTES DE PERFORACIÓN	97
4.4.1 Propiedades del CO ₂ supercrítico	98

4.4.2 Limpieza de cortes de perforación base aceite con CO ₂ supercrítico.	100
4.4.3 Instalación experimental	101
4.4.4 Resultados	102
5. METODO DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACION ENDRILL	104
5.1 ¿QUÉ ES ENDRILL?	104
5.1.1 Metodología	105
5.1.2 Uso del material encapsulado como sub-base	105
5.1.3 Seguimiento ambiental	106
5.1.4 Procedimiento a seguir en campo	106
5.1.5 Ventajas	107
5.2 EXPERIENCIA EN CAMPO	108
5.2.1 Resultados	108
6. COMPARACIÓN TÉCNICA DEL MÉTODO ENDRILL CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN	115
6.1 ANALISIS DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL	118
6.1.1 Contenido residual de aceite	118
6.1.2 Agua involucrada en el proceso	118
6.2 ANÁLISIS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO	120
6.2.1 Espacio requerido	120
6.2.2 Re-uso	120
6.2.3 Costos de tratamiento	121
CONCLUSIONES	123
RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFIA	126

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso a seguir de los cortes de perforación.	26
Figura 2. Sistema de circulación del fluido de perforación	28
Figura 3. Puntos de corte en equipos de control de sólidos	30
Figura 4. Zaranda vibratoria	31
Figura 5. Esquema de un hidrociclón de cono pronunciado	32
Figura 6. Equipo general de un Desarenador	33
Figura 7. Equipo general de un deslimador	34
Figura 8. Equipo general de un mudcleaner	36
Figura 9. Equipo general de una centrifuga	37
Figura 10. Unidad de Deshidratación	38
Figura 11. Proceso de Biodegradación	40
Figura 12. Esquema de las reacciones de Biodegradación	41
Figura 13. Esquema de funcionamiento del Bioventing	42
Figura 14. Perfil de una Biopilas	44
Figura 15. Esquema general del proceso Landfarming	47
Figura 16. Esquema de diseño y aplicación de los sistemas de biotratamiento.	49
Figura 17. Adicionamiento de tierra nativa a piscinas	64
Figura 18. Transporte de cortes desde la locación hasta el área de disposición final	64
Figura 19. Planta de desorción térmica	69
Figura 20. Diagrama esquemático del sistema de tratamiento por medio de microondas	92
Figura 21. Puntos supercríticos para varias sustancias	99
Figura 22. Principio de limpieza de los cortes de perforación base aceite con CO ₂ supercrítico	101

Figura 23. Instalación experimental para la limpieza de cortes base aceite con CO ₂ supercrítico	102
Figura 24. Procedimiento de campo para tratamiento de ripios de perforación	106
Figura 25. Colocación de encapsulado	111
Figura 26. Aspecto final de locación	111

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones de gravedad en sólidos de perforación	29
Tabla 2. Técnicas para tratamiento de sólidos de perforación	39
Tabla 3. Concentración máxima de metales pesados en la cal viva	79
Tabla 4. Proporciones de mezcla (todos los porcentajes son en peso)	80
Tabla 5. Características principales de ripios sin tratar	109
Tabla 6. Características principales ripios encapsulados	110
Tabla 7. Características de aguas de pozos, empleados en el seguimiento de lixiviados	113
Tabla 8. Selección de métodos convencionales y no convencionales para realizar la comparación técnica	116
Tabla 9. Comparación técnica	117
Tabla 10. Puntos a favor y en contra para cada técnica	119
Tabla 11. Comparación técnica entre Endrill y métodos no convencionales de tratamiento de cortes de perforación	122

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN TÉCNICA DEL MÉTODO ENDRILL CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN*

AUTORES: CYNDY ARGOTE SIERRA
JAIR ALEXANDER MARTINEZ DE LA HOZ**

PALABRAS CLAVES: Endrill, Lixiviación, Cortes de perforación.

Cada año miles de pozos de petróleo y gas son perforados alrededor del mundo, este proceso genera millones de barriles de residuos, principalmente los cortes y lodos; el manejo de estos residuos es un problema ambiental y económico para las compañías operadoras de explotación y producción de petróleo. El presente estudio es una respuesta a la creciente necesidad de buscar alternativas que nos permitan minimizar el impacto ambiental permitiendo un desarrollo sostenible de las empresas petroleras en las operaciones de manejo y disposición de cortes de perforación base aceite. Como caso tipo, se presenta un estudio sobre una tecnología denominada Endrill que brinda posibles soluciones a los problemas mencionados anteriormente y los resultados obtenidos de su aplicación en campo.

En el estudio realizado para la implementación de este proyecto se llevó a cabo: una investigación exhaustiva para la recolección de información sobre los métodos convencionales de tratamientos de cortes de perforación y sobre métodos de tratamiento no convencionales. La descripción de Endrill como una nueva tecnología la cual comprende: descripción del proceso, el tratamiento que se le debe hacer a los cortes y su aplicación en campo.

Endrill es una nueva tecnología empleada para la transformación de residuos de perforación en materiales de valor, mediante la aplicación de procesos de estabilización y solidificación. En este proceso se encapsulan los constituyentes indeseables del corte (aceites y sales) en una matriz sólida que impide su lixiviación al medio ambiente y gracias a estas transformaciones realizadas al ripio este puede ser utilizado como relleno en locaciones petroleras de limitado espacio.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director. Edelberto Hernández

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL COMPARISON OF THE ENDRILL METHOD WITH CONVENTIONAL METHODS OF DRILL CUTTINGS TREATMENT*

AUTHORS: CYNDY ARGOTE SIERRA
JAIR ALEXANDER MARTINEZ DE LA HOZ**

KEYWORDS: Endrill, Leaching, Drill cuttings.

Every year thousands of gas and oil wells are drilled around the world, this process generates millions of barrels of waste, mainly cuttings and muds; the treatment of this waste represents an environmental and economic problem for the companies operating the exploration and production of oil. This study is a response to the growing need for alternatives allowing the minimization of the environmental impact and giving place to a sustainable development of the oil companies in operations related to treatment and disposal of oil-based drill cuttings. As a test case, we present a study about both, a technology called Endrill, which offers possible solutions to the problems mentioned above and the results obtained from its field application.

In the study for the implementation of this project, the following was conducted: a thorough investigation to collect information on conventional methods of treatment of drill cuttings and some not widely used methods. The description of the Endrill method as a new technology, which includes: description of the process, the treatment the cuttings have to go through hand the field application of the process.

Endrill is a new technology employed for transforming drilling waste into valuable materials through the application of stabilization and solidification processes. In this technology, the undesirable constituents of the cuttings (oils and salts) are encapsulated in a solid matrix that prevents leaching into the environment. Due to the physical-chemical transformations performed to the waste, this can be used as filler in oil locations with limited space in nearby bodies of water. The materials obtained are in compliance with the environmental specifications listed in current environmental regulations.

* Project degree

** Chemical-Physical engineering faculty. Petroleum engineering school. Director: Edelberto Hernández

INTRODUCCION

Actualmente los desechos que mayor atención requieren durante las actividades de perforación son los lodos y cortes de perforación, puesto que estos deben cumplir con unas especificaciones mínimas antes de ser evacuados al medio ambiente.

Durante los últimos años para las empresas petroleras se ha convertido en una necesidad el hecho de buscar alternativas que permitan minimizar el impacto ambiental generado por las operaciones de perforación, puesto que en cada país se deben seguir las regulaciones existentes para la disposición de estos desechos de una manera segura y aceptable para el medio ambiente y teniendo en cuenta que esto permitiría a su vez un desarrollo sustentable de las mismas empresas las cuales generarían un impacto social positivo en la población, especialmente para la zona de influencia. Se han dispuesto algunos mecanismos que permiten el manejo y disposición de estos desechos de perforación entre ellos se pueden contar: minimización en fuente, re-uso/reciclaje y por último el tratamiento/disposición.

El encapsulamiento de cortes de perforación mediante aditivos de aluminosilicatos (ENDRILL) permite la transformación de ripios en materiales con valor agregado, que pueden ser utilizados como relleno de locaciones o llenante de mezclas asfálticas para capas de rodamiento en locaciones asociadas a pozos petroleros.

Esta tecnología consiste en la utilización de aditivos de aluminosilicatos que inmoviliza y fija los contaminantes en su forma menos soluble a una matriz sólida por interacción físico-química, impidiendo su migración al ambiente, de esta

manera los materiales obtenidos cumplen con las especificaciones ambientales exigidas.

La tecnología ENDRILL fue aplicada inicialmente en el distrito sur de PDVSA, desde agosto del año 2001, completándose en el año 2004 el tratamiento de 30 pozos que generaron unos 9.000 m³ de cortes encapsulados. Entre las razones por las cuales se implementó la tecnología de encapsulación esta: la imposibilidad de aplicación de los procesos tradicionales, ya que las locaciones petroleras se encuentran cercanas a cuerpos de agua y los niveles freáticos por lo general son altos; el procedimiento de encapsulación requiere de un mínimo de área, no perturba las operaciones de perforación y se realiza en línea; los costos del proceso de encapsulación son de ordenes menores a los del tratamiento tradicional.

Mediante este estudio se pretende realizar una comparación entre los métodos convencionales para el tratamiento y disposición de cortes de perforación base aceite con la tecnología Endrill descrita anteriormente. También se expondrán razones tanto ambientales como económicas por las cuales se recomienda esta tecnología frente a las ya existentes.

1. GENERALIDADES

La actividad de perforación de pozos petroleros genera desechos líquidos y sólidos que por sus características físico-químicas constituyen una fuente de contaminación para el ambiente en el cual se desarrollan y por tal motivo no pueden ser dispuestos de manera arbitraria, ya que podrían ocasionar daños al medio ambiente y a corto, mediano o largo plazo traerían problemas tanto legales como económicos a la empresa.

Los desechos generados durante las actividades de perforación presentan dos fases, una líquida constituida por el lodo de perforación y otra sólida formada por los cortes de perforación. Los cortes adquieren muchas de las características del lodo y por ende constituyen un desecho de difícil manejo y disposición al medio ambiente. Adicionalmente, durante la perforación se generan volúmenes de aguas utilizadas en el lavado de equipo, bombas de lodo, enfriamiento de motores y otros equipos, agua de lluvia contaminada, etc.

El lodo de perforación, pasa a ser desecho una vez que culmina su vida útil, cuando se descarta por tasa de dilución diaria o por derrame en la localización.

1.1 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

Las funciones del lodo de perforación sencillamente describen las tareas que el fluido de perforación puede realizar. Hay por lo menos diez funciones importantes del fluido de perforación

- Remover los cortes del fondo del pozo, transportarlos y liberarlos a la superficie con la ayuda de los equipos para el control de sólidos.

- Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación.
- Recubrir el pozo con un revoque de pared de baja permeabilidad.
- Controlar las presiones del subsuelo.
- Mantener los cortes y el material pesado en suspensión cuando se detenga la circulación.
- Soportar parte del peso de la sarta de perforación y del revestimiento.
- Prevenir o reducir al mínimo cualquier daño a las formaciones aledañas.
- Permitir la obtención de información sobre las formaciones penetradas.
- Transmitir potencia hidráulica a la formación, por debajo de la broca.
- Controlar la corrosión de los tubulares y herramientas dentro del pozo.

Finalmente varios autores llegan a la conclusión que la función más importante que un fluido de perforación realiza es reducir al mínimo la concentración de los recortes alrededor de la broca y el pozo. Por supuesto, al hacerlo, el propio fluido asume esta carga de cortes, y si éstos no se eliminan del líquido, éste rápidamente pierde su capacidad de limpiar el pozo y crea gruesas tortas de filtración alrededor del pozo.

En su mayoría, los lodos se clasifican en base agua y base aceite (invertido y 100% aceite) y los mismos son el principal contaminante de las aguas y los sólidos generados durante la perforación.

1.2 TIPOS BÁSICOS DE LODOS DE PERFORACIÓN

Los lodos de perforación son de diseño personalizado para adaptarse a cualquier complejidad del pozo, según el tipo de formación y las geometrías del pozo. Pero básicamente existen tres tipos de lodos de perforación, los cuales son:

1.2.1 Lodos de perforación en base agua

Los lodos de perforación más utilizados son los de base agua. Este fluido está compuesto de varias combinaciones y cantidades de agua fresca o salada, bentonita y aditivos químicos, que se determinan por las condiciones del fondo del pozo. Las reglas generales de operación son:

- a. Operaciones superficiales: para este caso se usa mucha agua, lodo natural y pocos aditivos químicos.
- b. Operaciones de perforación en formaciones duras: cuando se perfora formaciones duras de baja porosidad, se usa lodo liviano y de poco peso como fluido de perforación.
- c. Operaciones de perforación en formaciones blandas de alta porosidad y alta presión: estas formaciones se perforan con lodo pesado o denso como fluido de perforación.

Los lodos en base agua son los más comunes, de mayor uso en la perforación ya que son más económicos de mantener, fáciles de usar y además no contaminan las formaciones, la limitación para este tipo de lodo surge cuando se están perforando formaciones sensibles al agua como es el caso de las arcillas que al entrar en contacto con el agua se hinchan taponando la formación.

1.2.2. Lodos de perforación en base aceite

Los lodos de perforación en base aceite son caros y costosos de mantener, pero no son afectados por las formaciones sensibles al agua, además minimizan la corrosión en la sarta de perforación. También son aplicados en la perforación de pozos altamente desviados por su gran grado de lubricidad y capacidad de prevenir la hidratación de arcillas. También pueden ser seleccionados para aplicaciones especiales como pozos a altas temperaturas o presiones, minimizando el daño a la formación. Otra razón para escoger estos lodos base

aceite es que estos son resistentes a los contaminantes con la anhidrita, sal, y gases ácidos (CO₂ y H₂S).

1.2.3 Lodos de perforación a base de aire o gas

Los lodos de perforación a base de aire o gas son poco utilizados. Generalmente son usados para la perforación de zonas depletadas o áreas donde se encuentran presiones bajas de formación, la ventaja principal de este tipo de fluido es el incremento en la tasa de penetración, además utiliza compresores, requieren menos espacio y equipo. Estos lodos son inefectivos en áreas donde se encuentran grandes volúmenes de fluidos de formación. Un gran influjo de fluidos de la formación requiere convertir el fluido base gas o aire en un sistema base líquido. Como resultados, las posibilidades de pérdida de circulación o daño a zonas productoras son mucho mayores.

1.3 SOLIDOS DE PERFORACIÓN

En la exploración de hidrocarburos se encuentran varios efectos desafortunados, uno de estos es la acumulación de residuos que se presentan en las operaciones de perforación. Desde 1980 se empezó a darle importancia a la eliminación de los cortes y el exceso de fluidos de perforación. Normalmente, estos materiales se desechaban por la borda en las operaciones marinas o se sepultaban durante las operaciones en lugares específicos en la tierra. Aproximadamente entre los años de 1980 y 1990, las industrias empezaron una concientización ambiental global y la industria del petróleo y gas junto con sus reguladores no fueron la excepción, por lo que empezaron a comprender y apreciar el impacto ambiental potencial de los residuos generados durante la etapa de perforación.

Los cortes son los sólidos contenidos en el fluido de perforación además de las partículas que se desprenden de la formación. A estos cortes se les trata y de acuerdo a su disponibilidad final se les llama de una u otra manera, los cortes que pueden ser recuperados, reciclados, reutilizados o eliminados se les denomina residuos de perforación y a los que no pueden ser reciclados o reutilizados se les denomina desechos de perforación. Estos cortes tienen un tratamiento especial de acuerdo al lodo empleado durante la perforación.

1.3.1 Clasificación de los desechos sólidos según el lodo empleado

Los desechos sólidos generados durante las actividades de perforación poseen características físico-químicas que se derivan básicamente del fluido de perforación utilizado.

1.3.1.1 Desechos contaminados con lodos base agua. Los desechos contaminados con los lodos base agua, como el aqua-gel, son inocuos al ambiente, ya que sus características físico-químicas no superan los límites establecidos en las normas ambientales. En la mayoría de los casos estos fluidos son agua más bentonita y soda cáustica, en cuyo caso debe ser controlada, cloruros, unidades de pH y los sólidos totales en las aguas para descarga. Se caracterizan por ser de fácil manejo y económicos.

1.3.1.2 Desechos contaminados con lodos base aceite. Este tipo de desecho corresponde a sólidos de formación impregnados de fluidos base aceite que posee entre sus características químicas un alto contenido de hidrocarburos y algunos metales pesados como: plomo, cadmio, níquel, etc. En los efluentes líquidos el contenido de aceite, grasa e hidrocarburos queda en su mayoría, en forma flotante por no ser líquidos miscibles en agua. De igual modo, la materia orgánica le aporta al efluente niveles elevados en la demanda química y bioquímica de oxígeno.

Tanto los sólidos contaminados con lodo base agua como aceite deben ser acondicionados por el equipo de control de sólidos (ECS) que se encuentra en la superficie de la locación. La evaluación de estos sólidos se hace por evaporación de la fracción líquida y se mide en porcentaje donde para tal propósito se utiliza la retorta para su medición y el máximo porcentaje de sólidos perforados no debe superar el 8% del volumen total del fluido siendo 4% un valor óptimo.

1.4 MANEJO DE SÓLIDOS DE PERFORACIÓN

Técnicas como almacenamiento temporal, tratamiento y disposición en superficie son aplicadas en la actualidad en cada uno de los procesos que siguen los cortes de perforación al llegar a superficie, cada uno de ellos se ilustran en la figura 1.

Figura 1. Proceso a seguir de los cortes de perforación.



Fuente: Autores.

1.4.1 Equipo de circulación del fluido de perforación

El fluido de perforación juega un papel fundamental durante la perforación de pozos ya que le da estabilidad al hueco, ayuda a mantener la presión y es el

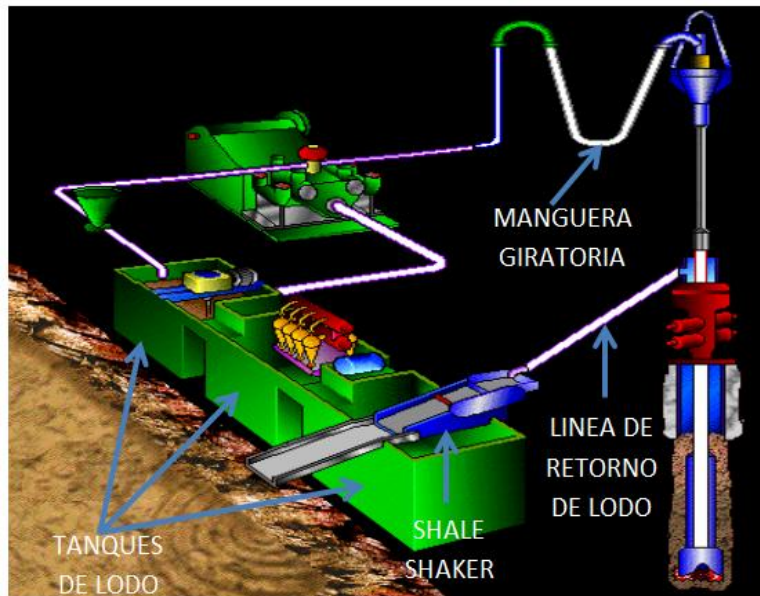
encargado de llevar los cortes de perforación que deja la broca a su paso hasta la superficie. Este fluido se rige por un sistema de circulación como se ilustra en la figura 2. A continuación se mencionan las estaciones que debe cumplir el fluido al atravesar dicho sistema.

Los tanques que contienen agua fresca tienen una línea que sale a las tolvas mezcladoras de químicos en donde se re circula por una línea que se encarga de llevar la mezcla agua-químicos a un tanque de homogenización el cual permite darle el acabado final al lodo donde dichos tanques están provistos por agitadores para una excelente mezcla. En el tanque de mezcla se homogenizan los químicos para darle las propiedades necesarias según el programa de perforación.

En los tanque de almacenamiento los cuales pueden tener una capacidad de 400 bbls, este lodo pasa a través de tres bombas de presión las cuales empujan el lodo por la manguera que se une al top drive pasando por el cuello de ganso o unión giratoria y permitiendo que dicho lodo llegue hasta los jets de la broca en el fondo del pozo para realizar sus tareas respectivas.

El lodo se devuelve a la superficie por el anular llevando consigo los cortes o ripios del pozo y luego de pasar por el sistema de remoción de sólidos o Equipo de Control de Sólidos (ECS) parte de él regresa al sistema activo.

Figura 2. Sistema de circulación del fluido de perforación



Fuente: Halliburton services company

1.5 CONTROL DE SÓLIDOS

El principal contaminante en un fluido de perforación lo representan los sólidos generados durante la perforación, los cuales se van incorporando al fluido, y a medida que son recirculados se reduce su tamaño y se dificulta su descarga del sistema. La remoción de éstos sólidos es uno de los aspectos más importantes del sistema de control de lodo ya que de este depende la eficiencia de la perforación, representando así una significativa porción de todo los costos de perforación.

Los tipos y cantidades de sólidos presentes en el sistema del lodo determinan la densidad del fluido, la viscosidad, los geles, el filtrado, la calidad del cake y otras propiedades químicas y mecánicas. Los sólidos y su volumen también tienen influencia en los costos del lodo y el pozo en general, incluyendo factores como tasa de perforación, hidráulica, tasa de dilución, torque y arrastre, pega diferencial, pérdida de circulación, estabilidad del hueco, problemas en la broca y el

ensamblaje de fondo. Esto a su vez influencia en el tiempo de vida de la broca, bombas y otros equipos mecánicos.

Los sólidos presentes en el lodo pueden ser separados dentro de dos categorías como se observa en la tabla 1:

Tabla 1. Especificaciones de gravedad en sólidos de perforación

De alta gravedad (HGS)	$SG > 4.2$
De baja gravedad (LGS)	$2.3 < SG < -2.8$

Fuente: Ballesteros, Cristina., “Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el campo Tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum”2007.

Los sólidos comerciales tal como barita o hematina son de la categoría de HGS y son usados para alcanzar densidades superiores a 10.0 lbs/gal ($SG > 4.2$). Sólidos perforados, arcillas y otros aditivos del lodo caen dentro de la categoría de los LGS y a menudo son sólidos usados para obtener densidades menores a 10 lbs/gal ($SG < 1.2$).

1.5.1 Objetivos de control de sólidos

- Maximizar la extracción de sólidos perforados
- Minimizar las pérdidas de lodo
- Minimizar la pérdida de sólidos comerciales (barita)
- Devolver lodo limpio al pozo
- Mantener adecuada reología del lodo para que cumpla sus funciones.

1.5.2 Equipo de control de sólidos

El objetivo de diseño de cualquier equipo de control de sólidos es alcanzar, paso a paso, la remoción progresiva de los sólidos perforados de acuerdo al tamaño de éstos, como se ilustra en la figura 3. Esto permite que cada equipo optimice el desempeño del equipo siguiente. Además, el sistema debe tener la habilidad para diferenciar entre los sólidos perforados y el valioso material pesante.

Figura 3. Puntos de corte en equipos de control de sólidos



Fuente: Curso de control de sólidos. MI SWACO. 2004

El punto de corte representa el potencial de la malla para diferentes tamaños de partícula, por ejemplo la centrifuga maneja puntos de corte entre cinco y diez micrones. A continuación se mencionan cada uno de los equipos que intervienen en el control de sólidos.

1.5.2.1 Zarandas vibratorias (Shaleshakers). El más importante dispositivo del equipo de control de sólidos (ECS) son las zarandas vibratorias ilustrado en la figura 4, el desempeño de las zarandas determina la eficiencia total del equipo de control de sólidos. Un pobre desempeño aquí no puede ser remediado más tarde. Las zarandas son mallas separadoras vibratoras usadas para remover los cortes de perforación proveniente del lodo, remueve grava, arena gruesa y fina con mallas de 24 a 325 mesh y pueden remover cortes relativamente secos. Estos

representan la primera línea de defensa contra la acumulación de sólidos. Este equipo mecánico no puede remover limonitas y sólidos coloidales, es así que la dilución y otro equipo son requeridos para sólidos perforados ultra finos. Se puede ajustar la amplitud de estas, por medio de la criba de vibración violenta del eje y bloques excéntricos.

Las zarandas son el único aparato removedor de sólidos que hace una separación basado en el tamaño físico de las partículas.

Figura 4. Zaranda vibratoria

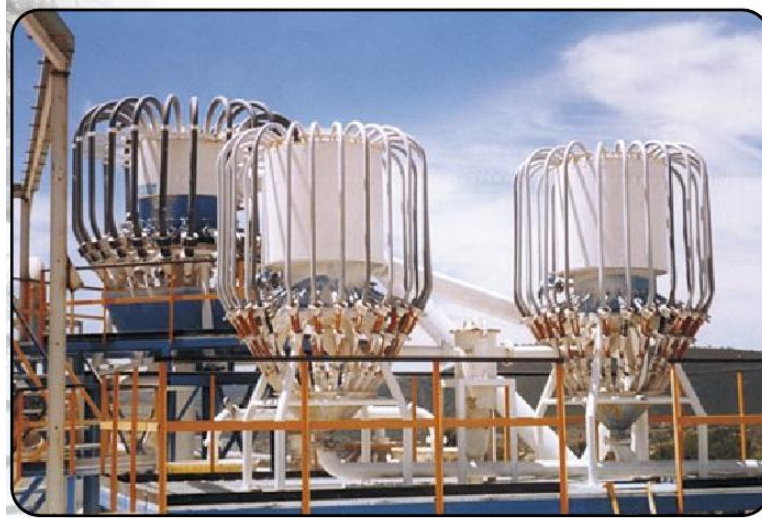


Fuente: Curso de control de sólidos MI SWACO. 2004

1.5.2.2 Hidrociclones. Los hidrociclones son recipientes de forma cónica en los cuales la energía de presión es transformada en fuerza centrífuga. La operación se basa en el uso de un flujo arremolinado para generar fuerzas centrifugas basándose en la diferencia de densidades. Los podemos encontrar estáticos y giratorios, en la figura 5 se observa un hidrociclón de cono pronunciado. En los hidrociclones estáticos se inducen fuerzas centrifugas con una alta velocidad y presión en la boca de entrada. En los hidrociclones giratorios la rotación mecánica proporciona el movimiento.

Los hidrociclones están disponibles en conos con diámetros de 1 a 12 pulgadas. Estos fueron usados primeramente para reducir el contenido de arena (sólidos más grandes de los 74 micrones). Hidrociclones con diámetros de 6 pulgadas o más grandes están identificados como desarenadores.

Figura 5. Esquema de un hidrociclón de cono pronunciado



Fuente: <http://www.eralgroup.com>

1.5.2.3 Desarenadores (Desanders). Los desarenadores son estructuras hidráulicas que tienen la función de mejorar la calidad del lodo, eliminando las partículas de cierto tamaño que la captación ingresó al sistema. El desarenador de ciclón ilustrado en la figura 6 generalmente está dado entre 10 y 12 pulgadas de diámetro (los conos desarenadores de 10 pulgadas de diámetro son recomendables ya que proveen la mejor combinación de separación y capacidad). Reduce el contenido de arena en la mayoría de los fluidos de perforación convencionales. También ayudan a limitar la reparación y reemplazo de partes de bombas dañadas por fluidos de perforación que contienen sustancias abrasivas. Son recomendados cuando los agitadores no pueden separar hasta 100 micrones o cuando aperturas más grandes son perforadas a 100 pies por hora o más rápido.

Los desarenadores son usados en fluidos con poco peso para separar partículas con tamaño arena de 74 micrones o más grandes. En fluidos pesados no es muy recomendable usar este equipo debido a que la densidad de la barita es sustancialmente más alta que la de los sólidos perforados.

Debe existir una ecualización entre los tanques del desarenador, por ello es recomendable contar con una válvula que comunique ambos tanque (gasificador y deslimador).

Figura 6. Equipo general de un Desarenador



Fuente: Curso de control de sólidos. MI-SWACO.2004

1.5.2.4 Deslimadores (Desilters). El deslimador es la tercera clase de equipos en el control de sólidos para el tratamiento de los fluidos de perforación. Como se ilustra en la figura 7 el deslimador consta de una serie de conos y de acuerdo con el tamaño del diámetro de éstos se dividen en desarenador y deslimador. Por lo general, si el diámetro del cono es de menos de 6 pulgadas se llama deslimador. Éste puede remover partículas de tamaño de limo y arena fina provenientes de los fluidos de perforación. Cuando se utiliza adecuadamente, remueve prácticamente todas las partículas de limo de más de 25 micrones. Tanto el deslimador y

desarenador son usados primordialmente cuando se perfora en hueco superficial donde lodos de bajo peso son usados.

Nunca el fluido para alimentar al deslimador debe ser del tanque donde se adicionan los químicos del fluido.

Figura 7. Equipo general de un deslimador



Fuente: <http://gnsolidscontrol.com>

1.5.2.5 Limpiadores de lodo (Mudcleaners). Los limpiadores de lodo son sistemas de procesamiento de separación de dos etapas que comprenden varias combinaciones de hidrociclones, desarenadores y deslimadores montados sobre una zaranda y diseñados para operar como una sola unidad como se puede observar en la figura 8. Se usa cuando hay poca disponibilidad de espacio.

El proceso remueve los sólidos perforados de tamaño de arena aplicando primero el hidrociclón al fluido y posteriormente procesando el desagüe de los conos en

una zaranda de malla fina. Generalmente se trata de 12 o más hidrociclones de 4 pulgadas por encima de finas mallas con zarandas de alta energía.

Un mudcleaner removerá sólidos perforados del tamaño de la arena y recupera barita de la descarga de los hidrociclones. Usa mallas hasta 325 mesh (250 mesh es la más típica). En lodos sin mucho peso, el limpiador de lodo debe utilizarse como un deslimador. El mudcleaner no remueve finos ni ultrafinos, parte de su descarga debe ser procesada por centrifugas.

Los parámetros que pueden ser ajustados durante la normal operación de un mudcleaner son los siguientes:

- Cantidad de conos.
- Tamaño / tipo de cono
- Tamaño de la malla.
- Velocidad de vibración.

Utilizados correctamente, los limpiadores de lodo disminuyen tanto los costos de lodo de perforación como los costos de eliminación. La principal aplicación del limpiador de lodo es para sistemas de fluido liviano donde la fase líquida es cara o ambientalmente no muy manejable (OBM).

Figura 8. Equipo general de un mudcleaner



Fuente: <http://gnsolidscontrol.com>

1.5.2.6 Centrifugas. Como los hidrociclones, las centrifugas de decantación incrementan la fuerza causando separación de sólidos mediante el incremento de fuerza centrífuga.

Las centrifugas son especialmente eficaces para satisfacer las necesidades de descarga de fluido sobre recortes en aquellas áreas ambientalmente sensibles. También generan altas velocidades de recuperación de fluido y un eficiente control de sólidos para reducir sustancialmente el costo global de fluidos del operador y limitar los volúmenes de eliminación de desechos. En los sistemas de fluidos de perforación densificados, las centrifugas de decantación recuperan hasta un 95% de barita, la cual se regresa al sistema activo al mismo tiempo que se desechan los sólidos más finos y de gravedad específica más baja. En los sistemas de deshidratación mejorados químicamente, las centrifugas disminuyen en gran medida los volúmenes de descarga de líquidos y mejoran significativamente la eficiencia del sistema de control total de sólidos.

Se pueden encontrar centrifugas decantadoras como la ilustrada en la figura 9 y verticales, las cuales también son conocidas como secadoras de cortes.

Figura 9. Equipo general de una centrifuga



Fuente: <http://gnsolidscontrol.com>

1.5.2.7Deshidratación (Dewatering). Deshidratación o dewatering, es el proceso mediante el cual se separa la parte líquida y sólida del fluido de perforación; es decir, una unidad de dewatering como la ilustrada en la figura 10 contempla el tratamiento por medio de la deshidratación de los volúmenes de lodo o de agua lodosa provenientes del sistema activo, de los canales perimetrales, del cellar, de los tanques de tratamiento de aguas y de la trampa de aceite y la posterior disposición adecuada de los sólidos generados y tratamiento del agua producida; para todo este proceso se utiliza polímeros y así separar hasta las partículas más finas y disminuir el contenido de sólidos en el agua.

Al finalizar la perforación de una sección determinada, todo el lodo del sistema deberá ser deshidratado y el efluente líquido debe enviarse a las piscinas de tratamiento de agua y los sólidos serán descargados en los tanques abiertos para su disposición en la zona de cortes.

Figura 10.Unidad de Deshidratación



Fuente: <http://sln-ec.com>

A. Componentes de una unidad de Deshidratación (Dewatering):

- Centrifuga con su bomba de alimentación
- Tanque de recepción
- Tanque de pre-mezcla de químicos
- Bomba de inyección y mezcla (Desplazamiento positivo)
- Bombas de transferencia.

Durante la perforación se debe evitar el incremento de volumen de fluido. El efluente del proceso de deshidratación se lo recicla en su totalidad 100% en diluciones (si la prueba de compatibilidad lo permite) en lavado de taladro y/o enfriamiento de las bombas.

2. TÉCNICAS PARA TRATAMIENTO DE SÓLIDOS DE PERFORACIÓN

El manejo inadecuado de materiales y residuos peligrosos ha generado a escala mundial, un problema de contaminación de suelos, aire y agua. Entre las más severas contaminaciones se destacan las que se produjeron y todavía se producen a causa de la extracción y el manejo del petróleo en todos los países productores de hidrocarburos.

Las tecnologías disponibles para el tratamiento de sólidos contaminados han sido agrupadas de distintas formas por diferentes investigaciones. La tabla 2 categoriza las tecnologías de tratamientos alternativas que existen en la actualidad.

Tabla 2. Técnicas para tratamiento de sólidos de perforación

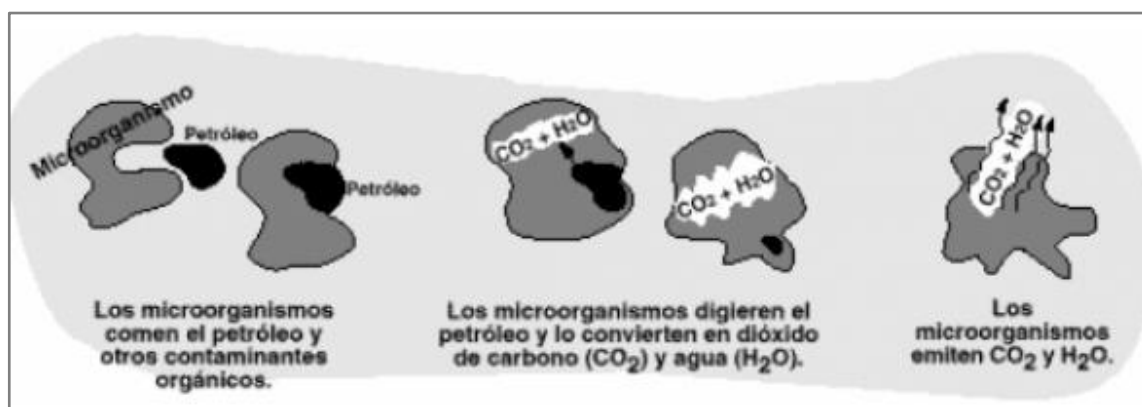
CATEGORIA GENERAL	TIPO DE PROCESO	TECNOLOGIA IN-SITU	TECNOLOGIA EX-SITU
TRATAMIENTO	BIOLOGICO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Biodegradación pasiva 2. Bioventilación 3. Biodegradación in-situ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Biopilas 2. Landfarming 3. Biodegradación en suspensión
	FISICO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ventilación de suelos 2. Flushing 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lavado de suelo 2. Aglomeración con alquitrán de carbón
	QUIMICO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Degradación química 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extracción con solvente
	TERMICO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calentamiento con radiofrecuencia 2. Vitrificación 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desorción térmica
CONFINAMIENTO	OTROS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Capping 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estabilización/Solidif. 2. Microencapsulamiento 3. Microconfinamiento 4. Landfilling

Fuente: <http://www.pecocorp.com>. Modificada por autores.

2.1 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS O TÉCNICAS DE BIOTRATAMIENTO

La biodegradación es la descomposición de una sustancia orgánica, como el petróleo, por acción de organismos vivos, generalmente microorganismos y especialmente bacterias. Algunas sustancias se biodegradan más rápida y completamente que otras como se ilustra en la figura 11.

Figura 11. Proceso de Biodegradación



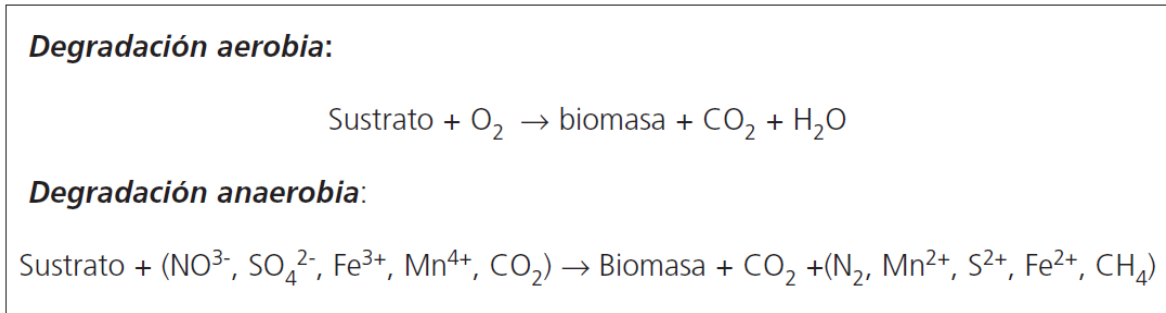
Fuente: Veracierta, Luis Emilio., "Evaluación de las técnicas realizadas por el centro de tratamiento y recuperación de desechos en el campo Hamaca, estado Anzoátegui" 2006.

La biodegradación final resulta en un compuesto que se convierte en agua y dióxido de carbono. Algunas sustancias pueden degradarse en moléculas intermedias más pequeñas. Esto es lo que se llama degradación primaria. Generalmente, estas moléculas son productos intermedios en el proceso de biodegradación final, pero en algunos casos, pueden ser más persistentes o más tóxicas que el contaminante original.

La biodegradación puede ocurrir en condiciones tanto aerobias (con oxígeno) como anaerobias (sin oxígeno) como se observa en la figura 12. Si el contaminante se encuentra bien disperso en el agua, generalmente hay más oxígeno disponible para la biodegradación aerobia. El lodo a base de agua se dispersa más fácilmente pues es soluble en agua. Los recortes con petróleo no se

dispersan tan bien, y tienden a establecerse en una pequeña área del lecho marino cerca del equipo de perforación. Esta alta concentración de material orgánico puede resultar en la generación de condiciones anaerobias cuando la rápida actividad bacteriana consume el oxígeno disponible en un área.

Figura 12. Esquema de las reacciones de Biodegradación



Fuente: Maroto, M^a Esther., Rogel, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos” 2000.

Maroto y Rogel (2000), señalan que las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana¹.

2.1.1 Biodegradación Pasiva

Utiliza los microorganismos naturalmente presentes en el medio para degradar lentamente los contaminantes petroleros biodegradables.

Los microorganismos metabolizan contaminantes dejando subproductos inofensivos. A diferencia de otros procesos biológicos, la biodegradación pasiva no

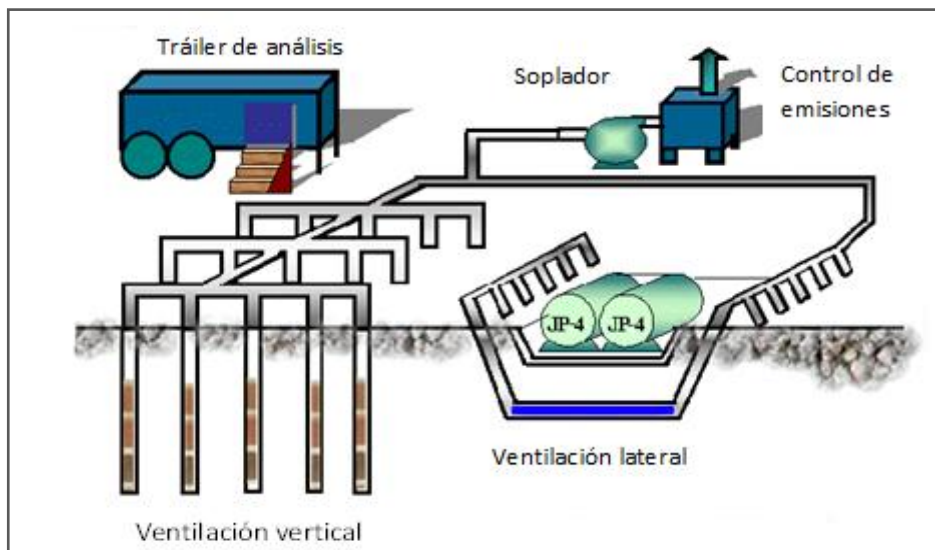
¹ Maroto, M^a Esther., Rogel, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos” 2000.

es mejorada por el agregado de nutrientes, alguna forma de oxígeno, y/o cultivo de microbios.

2.1.2 Bioventilación (Bioventing)

La técnica de bioventilación es un tratamiento de biorrecuperación de tipo “in situ”, consiste en la ventilación forzada del suelo mediante la inyección a presión de oxígeno (aire) en la zona no saturada del suelo a través de pozos de inyección como se ilustra en la figura13.

Figura 13. Esquema de funcionamiento del Bioventing



Fuente: <http://www.miliarium.com>

Debido a la aireación del suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes y por biodegradación ya que al incrementar la oxigenación del suelo se van a estimular la actividad bacteriana.

En contraste con la técnica de extracción de vapores, en el bioventing se utilizan bajos caudales de aire, para proporcionar sólo el oxígeno suficiente para mantener

la actividad microbiana. El aire se suministra de forma directa a la zona contaminada, y, además de la biodegradación de los hidrocarburos adsorbidos al suelo, se favorece un lento flujo de los compuestos volátiles, que pueden ser degradados al atravesar el suelo biológicamente activo.

La tecnología del bioventing ha sido satisfactoriamente utilizada en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo, disolventes no clorados, algunos pesticidas, conservantes de la madera y otros compuestos orgánicos. A pesar de no ser una técnica aplicable a la eliminación de compuestos inorgánicos, la biorremediación puede ser usada para cambiar la valencia de algunos de esos compuestos para que puedan ser adsorbidos en el suelo o bioacumulados en micro y macroorganismos.

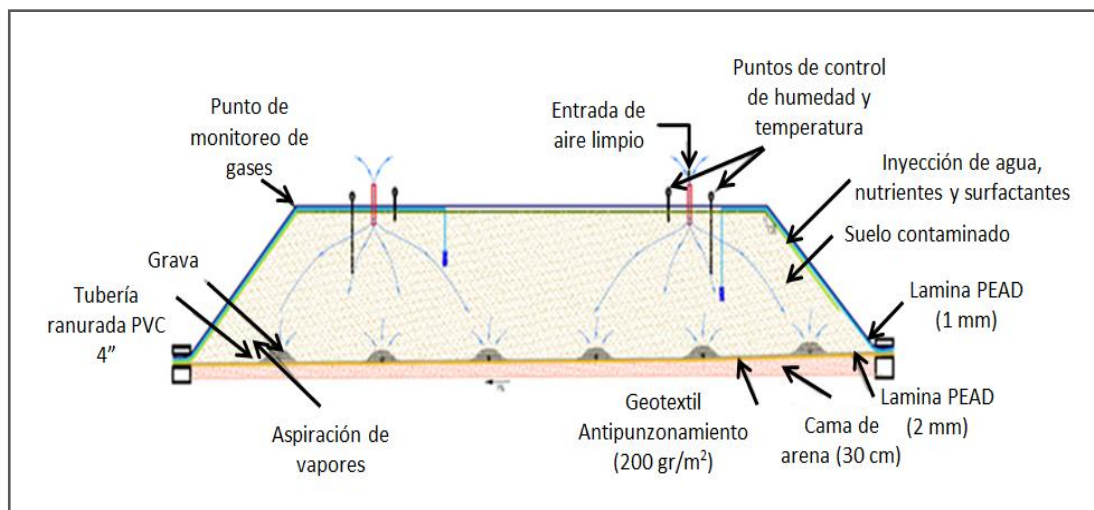
2.1.3 Biodegradación in-situ

El tratamiento de biodegradación in situ se realiza en el propio espacio contaminado sin extraer el suelo, mediante tecnologías innovadoras. En general es menos costoso, y normalmente permite que se utilice el espacio durante la recuperación, por lo que se aplica cada vez con más frecuencia. El inconveniente de este tipo de recuperación es el tiempo requerido, que generalmente es bastante largo. En esta técnica se estimula la actividad microbiana y biodegradación por circulación de soluciones base acuosa a través de los suelos contaminados.

2.1.4 Biopilas

Las biopilas constituyen una tecnología de biorremediación ex situ en la cual el suelo contaminado con hidrocarburos es extraído y dispuesto en un área de tratamiento o piscina previamente excavada para su descontaminación con microorganismos. El perfil de una biopilas se ilustra en la figura 14.

Figura 14. Perfil de una Biopilas



Fuente: <http://www.terratest.cl>

Las biopilas se utilizan cuando la sustancia contaminante es demasiado volátil como para ser tratada con la técnica de landfarming, ya que las emisiones gaseosas serían demasiado altas, o cuando se quiere acelerar el proceso de biorremediación.

La zona de tratamiento incluye sistemas de recolección de lixiviados y un sistema de aireación que cuenta con una serie de tuberías de PVC que son colocadas durante la construcción. Estas cañerías están interconectadas a un soplador de presión negativa o de vacío, que fuerza al oxígeno atmosférico a pasar a través de la pila de suelo. También se controlan otros parámetros como la humedad, la temperatura, los nutrientes o el pH. Existen en el mercado aditivos químicos específicos cuyas propiedades nutritivas pueden estimular la biodegradación. De esta manera se tiene un alto control sobre las condiciones de remediación y el medio.

La base de la piscina de tratamiento estará cubierta con una superficie impermeable para reducir al mínimo el riesgo de lixiviación de los contaminantes al

suelo limpio que queda debajo. Los lixiviados recogidos por el sistema de drenaje pueden ser tratados en un biorreactor en la misma zona.

Los montículos de suelo no suelen exceder los 2 o 3 metros como máximo y pueden estar cubiertos en la parte superior por plásticos impermeables para controlar la volatilización de los COV (compuestos orgánicos volátiles), que deberán ser tratados antes de su emisión a la atmósfera.

El tratamiento de suelos mediante biopilas se aplica fundamentalmente para la eliminación de COV no halogenados e hidrocarburos.

2.1.4.1 Ventajas de las biopilas

- Los contaminantes se destruyen en vez de pasar a otra condición.
- El diseño y construcción son relativamente fáciles.
- El saneamiento del suelo se lleva a cabo en un período entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo.
- El suelo saneado mediante biopilas no requiere ser confinado después.
- Las biopilas ofrecen un costo más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

2.1.4.2 Limitaciones

- Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de cinco y seis anillos son difícilmente degradables en las biopilas.
- Las biopilas no son efectivas para concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) superiores a 50000 mg/Kg.
- La presencia de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de microorganismos.

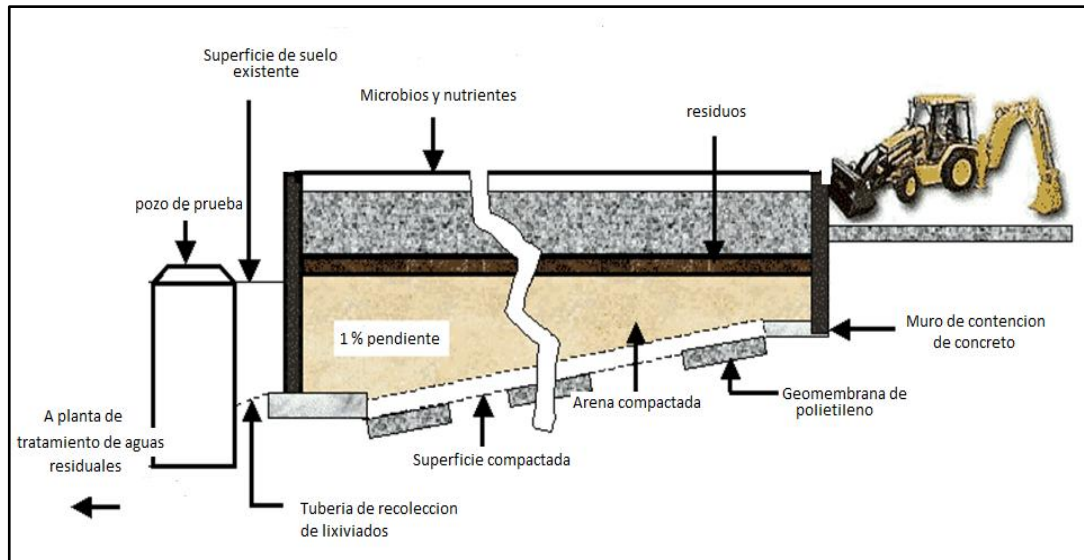
2.1.5 Landfarming

El landfarming es una tecnología de biorremediación ex-situ, similar a la biopila que requiere la excavación de los suelos contaminados y su disposición sobre una superficie impermeable (normalmente algún tipo de geomembrana). Esta geomembrana está dispuesta sobre la superficie del terreno adyacente a la zona contaminada o en una pequeña piscina excavada cerca de esta zona y sobre la que se vierte el suelo a tratar. Además, el proceso cuenta con un sistema de drenaje para la recolección de lixiviados, que deberán recibir algún tratamiento posterior. El esquema general del proceso se ilustra en la figura 15.

La descontaminación se basa en la acción de los microorganismos presentes en el suelo, por lo que la utilidad de tratarlos ex situ reside en poder controlar fácilmente las condiciones óptimas de biodegradación de los compuestos orgánicos. Fundamentalmente se controlan las siguientes condiciones:

- Contenido en humedad: se añade agua mediante un sistema de riego.
- Aireación: el suelo es volteado por métodos mecánicos periódicamente.
- pH: debe permanecer cerca de la neutralidad, por lo que se añadirán enmiendas de caliza en caso de aumentar la acidez.
- Otras enmiendas: nutrientes, inoculación de microorganismos.

Figura 15. Esquema general del proceso Landfarming



Fuente: <http://www.miliarium.com>

Por lo general, los contaminantes son tratados en levantamientos de medio metro de espesor. Cuando se consigue el grado de depuración deseada se retira este suelo y se añade una nueva capa, aunque puede ser útil retirar sólo la parte superficial del primer montículo y verter sobre el mismo nuevo residuo a tratar para que se aproveche la actividad microbiana existente.

El landfarming se usa satisfactoriamente en el tratamiento de lodos de refinería que contienen hidrocarburos del petróleo. Si existen compuestos muy volátiles en la mezcla, éstos pueden ser emitidos a la atmósfera antes de ser degradados por los microorganismos. La tasa de degradación se reduce si:

- Los hidrocarburos son muy pesados.
- Los compuestos presentan anillos en su estructura química, como es el caso de los HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos).
- Presentan cloro o nitrógeno.

2.1.6 Biodegradación en suspensión

Es un tratamiento ex-situ. Los suelos contaminados son excavados y tratados en una solución o suspensión acuosa dentro de un biorreactor que provee los nutrientes y microorganismos necesarios para una biodegradación exitosa y en donde ocurren la extracción y la biodegradación. La suspensión se forma por la adición de agua al suelo y el mezclado continuo permite mantener al suelo contaminado en suspensión. El mezclado permite romper los agregados de suelo favoreciendo la disolución de los contaminantes y reduce la resistencia a la transferencia de masa. En este sistema se propicia un mejor contacto entre los microorganismos, nutrientes, oxígeno y contaminantes, en consecuencia la tasa de biodegradación se incrementa. La presencia de sólidos en el reactor implica el uso de diseños especiales y la introducción de variables que no se contemplan en los biorreactores comunes.

El suelo junto con los nutrientes, agua y microorganismos se mezclan y airean hasta alcanzar el nivel de degradación satisfactorio. Al finalizar el tratamiento los sólidos deben separarse para regresarlos al sitio de origen o someterse a un tratamiento adicional; la fase líquida puede reutilizarse o enviarse a un sistema de tratamiento de agua.

La concentración de contaminantes afecta directamente a la capacidad de biodegradación. Si el suelo contiene concentraciones elevadas de contaminantes (más de 165 000 ppm) un lavado previo puede mejorar la biodegradación.

2.2 DISEÑO Y APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE BIOTRATAMIENTO

Antes de decidir qué tipo de biotratamiento se va a aplicar a los suelos contaminados se hace necesario llevar a cabo una serie de pasos los cuales

ayudaran a determinar cuál de los métodos mencionados anteriormente es el más factible para mi proyecto desde el punto de vista económico y ambiental. En la figura 16 se mencionan los pasos que se deben seguir.

Figura 16. Esquema de diseño y aplicación de los sistemas de biotratamiento.



Fuente: Maroto, M^a Esther., Rogel, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos” 2000.

2.2.1. Fase de investigación y caracterización

El primer paso para preparar el diseño de biotratamiento en el suelo, es la realización de una completa investigación del medio, que incluye principalmente el estudio exhaustivo de la caracterización del emplazamiento y del tipo y concentración de la contaminación existente.

La caracterización del emplazamiento se llevará a cabo mediante el estudio del mismo detallando la volumetría del suelo a tratar, las condiciones geológicas e hidrogeológicas, analizando las características del suelo y sus propiedades.

La caracterización del contaminante se centrará en la investigación del tipo y concentración del mismo, así como la biodisponibilidad de los compuestos en el suelo.

2.2.2. Análisis y elección de las medidas biocorrectivas

De la fase de investigación inicial, una vez identificadas las características del emplazamiento, del suelo y del contaminante, se podrá pasar al análisis y elección de las medidas biocorrectivas más adecuadas. Para ello será necesario:

- A. Identificar y cuantificar los contaminantes, definiendo sus propiedades físico-químicas más importantes:
 - Identificación y clasificación de compuestos.
 - Concentración en suelos y aguas subterráneas.
 - Caracterización de la presión de vapor, constante de Henry, densidad y grado de solubilidad.

- B. Conocer los factores que influyen en la transformación biológica de los contaminantes como lo son:
 - Factores ambientales: tales como humedad, oxígeno disuelto, temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes.
 - Factores microbiológicos: presencia de microorganismos y aclimatación de las poblaciones microbianas.

- C. Designar las medidas biocorrectivas, en función de los factores anteriormente expuestos, se elegiría el sistema de biotratamiento más adecuado.

2.2.3. Diseño y evaluación del sistema

Para el diseño de un sistema de biorrecuperación es necesario establecer unas etapas de trabajo, en las cuales se determinan y evalúan los parámetros fundamentales necesarios para su eficacia.

Las etapas a seguir en el diseño de un sistema de biotratamiento son:

- Evaluación de la viabilidad de la técnica. Se estudiarán los parámetros de evaluación que definen el sistema elegido, así como se evaluará las condiciones de biotratabilidad, los objetivos de limpieza exigidos y los costos de tratamiento necesarios.
- Evaluación del diseño. Se estudiarán los factores que afectan la eficacia de la técnica y las posibles mejoras o acondicionamientos a aplicar.
- Evaluación del control y seguimiento

2.2.4. Control y seguimiento

Para asegurar la correcta ejecución y un progreso adecuado del tratamiento se debe llevara cabo un plan de control y seguimiento del sistema. Para una correcta optimización se deberán controlar los siguientes puntos:

- Control de las condiciones de degradación y biodegradación. Se registrará la variación de concentración de CO₂ desprendido, oxígeno disuelto y la variación de nutrientes.
- Control de los parámetros que afectan directamente en el funcionamiento del sistema.

2.2.5. Análisis e interpretación de resultados

En esta última etapa se analizan los resultados obtenidos, haciendo un balance de los objetivos alcanzados y los marcados inicialmente. En este punto, si fuese necesario, se deberán proponer y estudiar aquellas mejoras o modificaciones necesarias para la optimización del sistema, de manera que los resultados obtenidos sean los más adecuados para mi proyecto.

Maroto y Rogel (2000), describen que las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación son técnicas de descontaminación suficientemente estudiadas y evaluadas, basados en los procesos de biodegradación y fácilmente aplicables.

Es necesaria una investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento de forma rigurosa para evaluar y elegir la medida biocorrectiva más adecuada y diseñar el sistema de manera óptima, así como es necesario llevar a cabo un control y seguimiento del mismo².

2.3 TRATAMIENTOS FISICOS

Este tipo de técnicas generalmente no alteran la composición química de los contaminantes sólo separan o concentran los materiales tratados aprovechándolas diferencias en las características físicas tales como densidad, presión de vapor, tamaño de partícula. Los procesos físicos rara vez se usan como la opción de tratamiento final para cualquier material contaminado.

² Maroto, M^a Esther., Rogel, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos” 2000.

2.3.1 Ventilación de suelos

Se considera un método de eliminación pasiva para contaminantes volátiles. El suelo se excava y se vierte una fina capa, de unos 20 cm, sobre una superficie impermeable y se espera a que los COV (compuestos orgánicos volátiles) se volatilicen. Para favorecer la volatilización se procede a la remoción periódica, por ejemplo, mediante el arado.

El riego también favorece el proceso ya que el agua disuelve los contaminantes y produce su desorción y al evaporarse los arrastra hacia la superficie. Además, la humedad acelera la actividad de los microorganismos. También al extender el suelo se aumenta su temperatura y se expone a la acción de los vientos, con lo que aumenta la volatilización.

En general se trata de un proceso muy lento y tiene el inconveniente de que los contaminantes son devueltos directamente a la atmósfera, sin sufrir ninguna depuración. No obstante, estos compuestos devueltos a la atmósfera tienden a degradarse rápidamente. Los hidrocarburos reaccionan fácilmente con los radicales hidroxilo atmosféricos, degradándose en un plazo que va desde un solo día para el dodecano hasta los nueve días para el benceno. Por otro lado, los disolventes clorados industriales se descomponen fotolíticamente con gran rapidez por acción de las radiaciones ultravioleta. La posible contaminación atmosférica se puede evitar si el suelo excavado es transportado a naves cerradas en las que se pueden recoger los gases para su posterior tratamiento y controlar las condiciones ambientales. La principal ventaja de esta técnica es su bajo costo económico.

2.3.2 Flushing

Tratamiento in-situ. Es una tecnología utilizada para la extracción de los contaminantes del suelo. Funciona mediante la aplicación de agua a la tierra. El

agua tiene un aditivo que mejora la solubilidad de los contaminantes. Los contaminantes que se disuelven en la solución de lavado se filtran a las aguas subterráneas, que luego se extraerán y se tratarán. En algunos casos, la solución de lavado se inyecta directamente en el agua subterránea. Esto plantea la tabla de agua en la franja capilar justo por encima de la superficie de la capa freática, donde las altas concentraciones de contaminantes se encuentran normalmente. En muchos casos, se utilizan disolventes o surfactantes (detergentes) como el aditivo. La eficacia de este proceso depende de las variables hidrogeológicas (por ejemplo el tipo de humedad del suelo) y el tipo de contaminante.

2.3.3 Lavado de suelos

Es un tratamiento ex-situ. El lavado del suelo es un proceso físico que consiste en la excavación del suelo del área contaminada, luego se tamiza para separar objetos grandes, rocas y después se lava con agua o una solución acuosa para remover los contaminantes, el efluente contaminado se recupera, se trata y se recicla o se dispone. Generalmente el solvente de extracción es agua, aunque se pueden usar otros cuando los contaminantes son ligeramente solubles en agua. Los solventes se seleccionan considerando su capacidad de solubilizar los contaminantes y su toxicidad sobre el ambiente y la salud. Cuando se van a tratar compuestos poco solubles en agua se utilizan tensoactivos apropiados para mejorar la eficiencia de remoción. Los tensoactivos pueden ser muy efectivos para contaminantes orgánicos y los ácidos son útiles para remover metales.

Los contaminantes generalmente están enlazados química o físicamente al cieno o arcilla. El cieno y la arcilla están ligados a grandes partículas de arena y grava. El lavado de suelo separa las partículas finas de cieno y arcilla, de las partículas de grava y arena granular. De esta manera las partículas grandes se remueven y los contaminantes se concentran en un volumen menor haciendo la restauración posterior más fácil.

2.3.4 Aglomeración con alquitrán de carbón

Tratamiento ex-situ. Es un proceso de extracción que usa un solvente sólido para remover contaminantes. El proceso opera bajo el principio que los constituyentes oleosos residuales son fuertemente adsorbidos sobre la superficie de carbón finamente dividido, y que el aglomerado carbón-orgánico que se forma puede ser separado del suelo en una suspensión acuosa.

2.4 TRATAMIENTOS QUIMICOS

Consiste en tratamientos similares a los de degradación in situ, pero difiere que en este caso se presentan mejores eficiencias de tratamiento al homogeneizarse el suelo con el reactivo controlándose el proceso.

2.4.1 Extracción con solventes

Es una técnica de tratamiento que consiste en usar un solvente para separar o retirar contaminantes orgánicos peligrosos de lodos residuales, sedimentos o tierra. Este método no destruye los contaminantes, sino que los concentra para que sea más fácil reciclarlos o destruirlos con otra técnica.

En un tanque se pone en contacto la tierra contaminada con el solvente, separándose en tres componentes o fracciones: solvente con contaminantes disueltos, sólido y agua, en las cuales se concentran los distintos contaminantes. Cada una de estas fracciones puede ser tratada o eliminada individualmente en una forma más eficaz en función del costo. Es eficaz para tratar sedimentos, lodos residuales y tierra que contienen principalmente contaminantes orgánicos, como bifenilos, policlorados, compuestos orgánicos volátiles, solventes halogenados y desechos de petróleo. No es aplicable para extraer contaminantes inorgánicos

debido a que estos materiales no se disuelven fácilmente en la mayoría de los solventes.

En este proceso pueden ser utilizados los siguientes solventes: dióxido de carbono líquido, butano, propano, metanol, acetona, etc. Dentro de las limitaciones de esta técnica se encuentra que la presencia de plomo y de otros contaminantes inorgánicos los cuales podrían interferir en la extracción de materiales inorgánicos. En algunos casos es necesaria la aplicación de un tratamiento preliminar extenso de los desechos para sacar o desmenuzar los terrones grandes y mediante este proceso no se reduce la toxicidad de los contaminantes por lo que el producto final del proceso debe ser sometido a un tratamiento ulterior o eliminado.

Usa hasta 14 solventes combinados que pueden disolver los contaminantes específicos en el suelo y mezclarse con agua. Los solventes se calientan para extraer los contaminantes del suelo.

2.4.2 Degradación química

Consiste en la adición de una sustancia química para inducir la degradación química.

Existen tres tipos de degradación:

- Oxidación mediante aireación o adición de agentes oxidantes.
- Reducción por adición de agentes reductores.
- Polimerización de ciertas sustancias orgánicas mediante la adición de hierro y sulfatos.

Los factores que controlan la eficacia del sistema son: el tipo de contaminante, las características del suelo (permeabilidad para la inyección de aditivo, arenas o materiales no finos para facilitar su mezclado in-situ, la presencia de obstáculos

subterráneos que impidan el mezclado superficial, profundidad de la contaminación del suelo y la posible generación de contaminantes más tóxicos que los originales (oxidación de mercurio, cromo)).

2.5 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Busca la destrucción de los contaminantes presentes en el suelo mediante el suministro de calor.

2.5.1 Calentamiento con Radiofrecuencia

Es un tratamiento in-situ. El principio de calentamiento por radio frecuencia se basa en el movimiento de cargas eléctricas debido a un campo eléctrico dentro de un átomo dado y a los límites entre dos entornos homogéneos. Al aplicar un campo eléctrico a un material, sus átomos o moléculas con cargas negativas y cargas positivas tienden a deformarse, ya que las cargas son atraídas por electrodos de polaridad opuesta. Cuando se invierte la polaridad del electrodo, las cargas del átomo o molécula van en sentido opuesto y estos cambios sucesivos de dirección causan calentamiento y, a mayor frecuencia del campo eléctrico, más intensa será la fricción y mayor el calentamiento.

El calentamiento por radio frecuencia usa energía electromagnética similar a un microondas para volatilizar los contaminantes petroleros de los cortes contaminados.

El calentamiento por radio frecuencia es adecuado sólo para calentar cuerpos que no conduzcan electricidad.

2.5.2 Vitrificación

La vitrificación es un proceso de tratamiento térmico que emplea calor para convertir el material contaminado en un producto cristalino, químicamente inerte y estable parecido al vidrio. El proceso consiste en introducir electrodos dentro del suelo contaminado que debe contener niveles significativos de silicatos. En la superficie los electrodos se conectan al suelo por medio de grafito, se aplica una corriente eléctrica muy alta que pasa a través de los electrodos y el grafito y el suelo se funde como resultado de la elevada temperatura. Es necesario atrapar los gases y vapores que escapan debido a que algunos contaminantes se evaporan. Una vez que se enfría el suelo, los contaminantes quedan químicamente enlazados por el calor dentro del vidrio formado.

Algunos contaminantes son volatilizados, mientras otros son encapsulados en matrices de vidrio. Utiliza mezclas de óxidos adecuados, formadores de la matriz vítrea. Es efectivo para tratamiento de inorgánicos, como así también de orgánicos. Los altos costos de capital inicial, el alto consumo energético han colocado a esta tecnología en un campo económico incierto.

Los componentes no volátiles se integran en la matriz vítrea, mientras que los constituyentes orgánicos son destruidos en un proceso parecido a la pirolisis. Los gases que se evaporan pueden ser recogidos en una campana instalada en la superficie del terreno.

El proceso se favorece con bajos contenidos de humedad, pudiendo utilizarse en suelos saturados, pero con un alto costo, siendo necesaria una disponibilidad de electricidad suficientemente alta y un equipo técnico adecuado.

2.5.3 Desorción Térmica

Es un tratamiento ex-situ. Implica la aplicación de calor a los suelos y sólidos contaminados para promover la volatilización de los COV (compuestos orgánicos volátiles). Así como los contaminantes vaporizan, son desorbidos y separados de la matriz sólida. Dependiendo de la tecnología específica empleada, los contaminantes volátiles o son destruidos en cámaras específicas de tratamiento o son condensados y recuperados.

La desorción térmica no es un sistema de incineración ni se forman subproductos de combustión. Es aplicable para tratar compuestos de peso molecular intermedio (aceites lubricantes, aceites minerales, combustibles) y en suelos relativamente permeables.

2.6 OTROS TRATAMIENTOS

Como se ha venido mencionando a lo largo de este capítulo son muchas las tecnologías disponibles para el tratamiento de cortes de perforación, pero algunas de estas tecnologías como las que se mencionaran a continuación no son muy difundidas gracias a que requieren equipos especiales y consumos elevados de recursos energéticos y de otro tipo para su aplicación.

2.6.1 Estabilización/Solidificación

Es un tratamiento in-situ o ex-situ. Utiliza cal, cemento y ocasionalmente mezclas de cemento/bentonita, para ligar los contaminantes y suelos en una matriz para que los contaminantes no lixivien al medio ambiente. Esta tecnología es aplicable (con reservas) para contaminaciones con metales pesados. No está recomendada para el tratamiento de residuos oleosos.

2.6.2 Microencapsulación

Es un tratamiento ex-situ. Se utilizan agentes oleofílicos especiales como arcillas organofílicas, que adsorben los contaminantes orgánicos. Conjugados con agentes binders (ligantes) especiales, se construye una microcápsula donde el contaminante quedará confinado, evitando su lixiviación en el medio ambiente. Dada la doble CEC (capacidad de intercambio catódico) interna y externa de las zeolitas, éstas presentan ventajas considerables frente a las arcillas organofílicas, aunque no son los únicos agentes oleofílicos empleados recientemente se están empleando aluminosilicatos.

2.6.3 Capping

Es un tratamiento in-situ o ex-situ. Es una técnica que consiste simplemente en dejar los residuos en su lugar aislándolo del medio ambiente mediante la colocación de una capa de tierra y / o material sobre los residuos contaminados para evitar la propagación de la contaminación. Capping proporciona un camino viable para remediar un área que está contaminada. Es una opción cuando otro tipo de tratamiento es demasiado caro y la zona que rodea el lugar es un sistema de baja energía. Numerosos casos de éxito existen, la tecnología se expande y se vuelve más popular. Las técnicas de tapado tiene usos desarrollados en química, biología, ingeniería geotécnica, ingeniería ambiental, ingeniería geotécnica y ambiental.

2.6.4 Microconfinamiento

Los sistemas de Microconfinamiento hacen uso de reacciones de precipitación/absorción para inmovilizar químicamente los constituyentes peligrosos y a menudo los incorporan en una masa solidificada mediante la adición de diversos aditivos consolidantes. El producto sólido resultante puede utilizarse a

menudo en la industria de la construcción. Sin embargo, dada la compleja naturaleza química de muchos materiales de residuo, es difícil inmovilizar todos los contaminantes. El resultado es que muchos contaminantes deben tratarse aun como materiales que exigen un nuevo confinamiento. Además los residuos tratados por aquellos métodos no resultan adecuados para una futura recuperación si el mercado o las normas de regulación así lo estableciesen.

2.6.5 Landfilling

Es un tratamiento ex-situ. También conocido como una técnica de enterrado y relleno en el que los suelos y sólidos contaminados son transportados hacia un lugar donde, por sus características, es permitida y aceptada su disposición final. Es un sistema de relleno; por lo tanto, deberá estudiarse muy bien con qué tipo de material contaminante se está realizando el landfilling.

En algunas circunstancias, este tratamiento se realiza fuera del sitio y en otros casos, las compañías petroleras con una gran cantidad de actividad de perforación en un área pueden construir y operar rellenos sanitarios privados.

En algunos casos antes de enterrar y rellenar los sólidos contaminados se realiza un previo revestimiento inferior cubierto por una barrera geológica la cual se ha desarrollado para prevenir la contaminación del suelo y finalmente un revestimiento superior o relleno. Esta técnica es aplicable a cortes con bajo contenido de hidrocarburos o cortes base agua. Es una tecnología sencilla y de bajo costo.

3. SISTEMAS TRADICIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN APLICADOS EN LA INDUSTRIA

El manejo de los rípios de perforación se realiza en la locación, por una empresa que presta este tipo de servicios o fuera de la locación, en los llamados “centros de acopio” bien sea en los terrenos de la empresa operadora o de la empresa de servicios. Es así que la forma de manejo de desechos depende principalmente de las características de la región (tipo de suelo, nivel freático, topografía, etc.) La decisión de cual alternativa usar depende principalmente de los parámetros a regularse, de la cantidad de desechos a disponer, del área asignada para la disposición, tipo de agente fijador seleccionado, etc.

El procedimiento por el cual debe pasar el desecho de perforación después de ser descargados por el equipo de control de sólidos es el siguiente:

- Almacenamiento temporal
- Tratamiento y disposición final

3.1 ALMACENAMIENTO TEMPORAL

Los rípios de perforación después de pasar por el equipo de control de sólidos son llevados temporalmente a piscinas de cortes para luego ser trasladados y tratados, en algunas ocasiones los rípios son tratados en la misma piscina de cortes. En el caso de que los cortes sean tratados en algún centro de acopio y éstos no puedan salir de la locación entonces hay piscinas para estos casos llamadas piscinas de contingencia.

Todos los cortes de perforación provenientes de los equipos de control de sólidos son descargados dentro de un tanque de 40 pies (tanque de las zarandas) por medio de bandejas metálicas. El lodo que se pierde por las zarandas es succionado del tanque de cortes y bombeado al sistema activo a través de las zarandas, o se bombea al sistema de dewatering. Muchas veces este tanque no hace la vez de colector temporal sino que se podría tratar los ripios ahí mismo es así que si los cortes en el tanque están húmedos, se utilizará cal viva y/o silicato para deshidratarlos y/o fijarlos y poder transportarlos para su disposición final.

3.2 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL

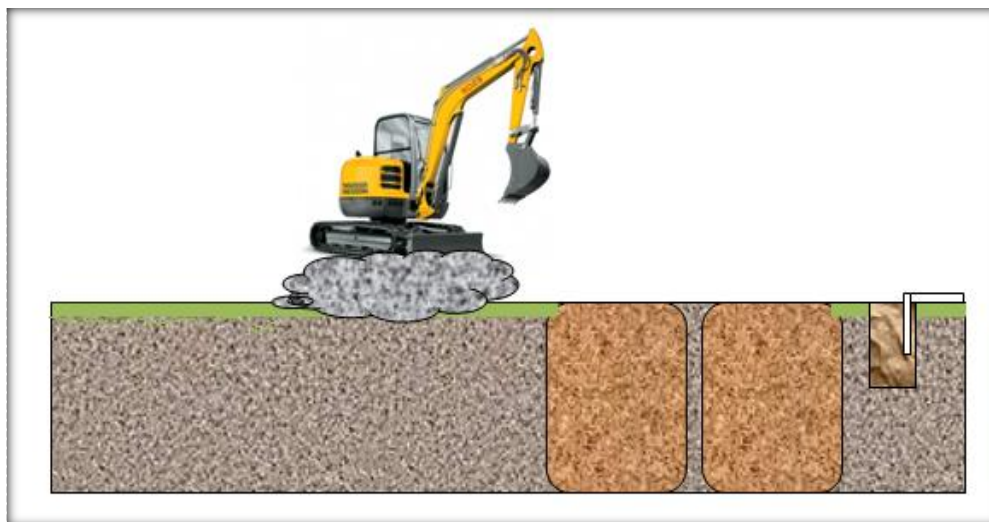
Dentro de las opciones para tratar los ripios se tienen las siguientes:

3.2.1 Confinamiento en piscinas y celdas

Este proceso se utiliza cuando se perforan los pozos con lodos tipo base agua y que de acuerdo a las estadísticas de un gran número de análisis de laboratorio y muestreos que se han realizado, se ha llegado a establecer y a concluir que los resultados cumplen con las normas establecidas.

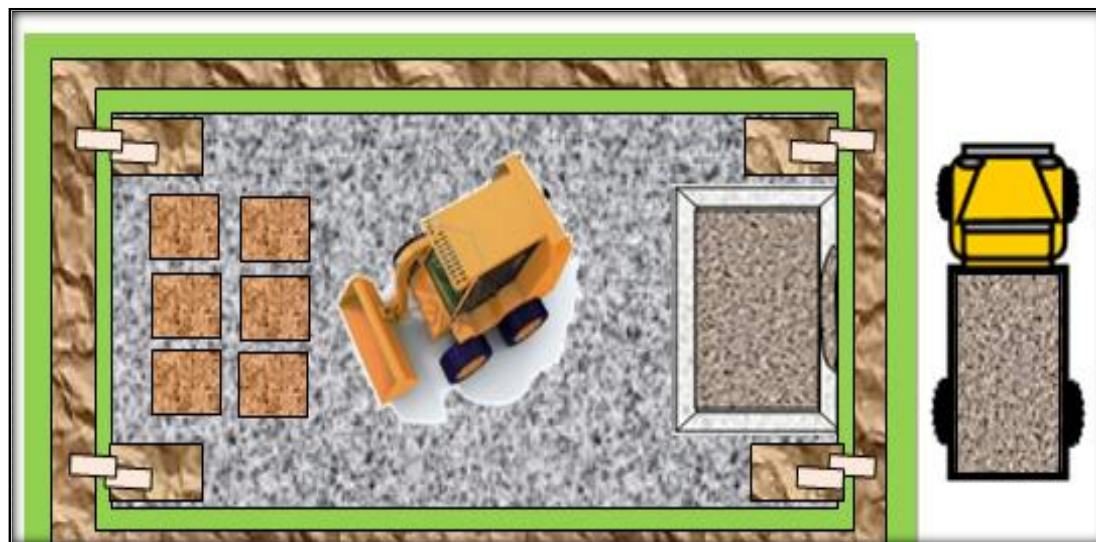
Las piscinas construidas dependen de la profundidad, diámetro de las secciones y tipo de perforación (direccional, horizontal o vertical) del pozo para lo cual hay programas para calcular la capacidad de dichas piscinas las figuras 17 y 18 ilustran el procedimiento a seguir en campo.

Figura 17. Adicionamiento de tierra nativa a piscinas



Fuente: Ballesteros, Cristina., “Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el campo Tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum”2007.

Figura 18. Transporte de cortes desde la locación hasta el área de disposición final



Fuente: Ballesteros, Cristina., “Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el campo Tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum”2007.

3.2.1.1 Metodología

- Se deben tener celdas con capacidades semejantes a 90 m³ esto se puede lograr con la ayuda de una excavadora modelo 320 o de similares características. Estas celdas son construidas en las partes laterales o al costado de las piscinas, el largo y ancho varía dependiendo del espacio disponible entre 4 a 7 metros que es la medida más usual y adecuada; la profundidad depende del nivel freático, normalmente esta entre 2 a 4 metros, pero siempre se deja por lo menos un metro de suelo entre los cortes de perforación y el nivel freático. Es recomendable que desde que se empiezan a construir las piscinas se tome en cuenta el espacio para las celdas para no tener problemas a futuro en el tapado.
- Las celdas deben contar con un puerto de comunicación con la piscina (canal), por donde fluyen dichos lodos que generalmente son licuados.
- Una parte de los cortes que contiene sólidos secos producto del proceso de deshidratación y los cortes de perforación obtenidos de la utilización de la centrifuga de alta velocidad (sólidos de baja gravedad o LGS), se mezclan o remueven con los demás cortes más húmedos o licuados en la piscina para darle mayor consistencia y facilitar el tapado de la misma.
- Un porcentaje de silicatos o material secante se envía hacia la piscina para luego remover en su interior hasta homogenizar todos los cortes, a éstos se los deja decantar por un tiempo considerable, en donde por densidades y gravedad el más pesado va al fondo y el más liviano forma un lodo licuado superficial.
- El agua producto del proceso anterior es evacuada hacia los tanques horizontales o verticales para su tratamiento físico-químico y posterior evacuación de la misma teniendo en cuenta que estas deben cumplir con las normas ambientales vigentes.
- La tierra nativa que se retiró anteriormente producto de la excavación en la construcción de las piscinas se adiciona alrededor de la misma para su

posterior taponamiento que inicia por el lado contrario a la celda siempre mezclando al 100%; para que por empuje natural sea desplazado el lodo licuado hacia la celda para ser estabilizado mediante una mezcla con silicatos o aditivos para control de pH y por último la tierra nativa producto de la excavación siempre y cuando sirva , en proporciones que dependen de la humedad de los cortes. Luego es devuelto a la piscina en un proceso repetitivo hasta lograr obtener el secado de los cortes y cumplir con los parámetros exigidos. En caso de que existan trazas de crudo en los cortes de perforación se utilizaran piscinas impermeabilizadas con geo-membrana.

- El proceso anterior se lleva a cabo las veces que sea necesario hasta que el nivel en la piscina sea manejable y permita tapar manteniendo un nivel adecuado respecto a la plataforma, es decir que no por efecto de los muros laterales de la piscina siempre tendrá un rango entre 30 y 50 cm, esta sobre-elevación debe tener forma cóncava y además es necesaria para prever el proceso de consolidación del material tratado a través del tiempo, luego de la cual se asienta y baja el nivel.
- Para finalizar el tapado de las piscinas se nivela toda el área sobre el cual se trabajó, se compactan y se peinan los taludes y por último se construyen canales alrededor de la zona para evitar la acumulación de aguas lluvias.

3.2.1.2 Equipo necesario

En la locación de perforación:

- Gallineta: para realizar el cargue de las volquetas.
- Volqueta: para el transporte de cortes desde la locación hasta el área de disposición final.

En el área de disposición final:

- Retroexcavadora: para la construcción de celdas, mezcla de cortes y tapado de celdas.

3.2.1.3 Ventajas del método

- Es un método sencillo de aplicar sin mayor laboreo ingenieril, es más bien mecánico y de aplicación rápida, es decir no tenemos que esperar mucho para que los parámetros se regulen.
- Excelente para pozos direccionales por lo que abarca en una sola piscina los ripios de todo un pozo.

3.2.1.4 Desventajas. Existen algunos limitantes para obtener un tapado uniforme y a un nivel aceptable respecto a la plataforma. Entre los cuales se puede mencionar a los siguientes:

- Tipo de suelo: existen arcillas plásticas bastante difíciles de manejar, cuando se intenta hacerla mezcla para estabilizar los cortes; esto constituye un reto porque el material se pega a la cuchara de la excavadora complicando su labor, sin embargo se buscan formas de trabajar que nos permitan cumplir con los objetivos como es el de llevar tierra de otros lugares para poder taponar con facilidad.
- Espacio disponible para la construcción de celdas: en algunas locaciones no se dispone del espacio mínimo requerido para construir las celdas que nos ayudan a manejar de forma óptima los cortes (volúmenes pequeños) y obtener un tapado con niveles aceptables respecto al de la plataforma.
- Este método es solo aplicado para ripios base agua.

3.2.2 Desorción Térmica

La desorción térmica es una técnica utilizada para tratar los ripios de perforación contaminados con desechos peligrosos calentándola a una temperatura de 90°C a

540°C a fin de que los contaminantes con un punto de ebullición bajo se vaporicen (se conviertan en gases) y por consiguiente, se separen de la tierra. Los contaminantes vaporizados se recogen y se tratan, generalmente con un sistema de tratamiento de emisiones, en la figura 19 se observa la planta de tratamiento empleada en este proceso.

Este método aplica para el caso de un sistema de lodo base sintético en la perforación donde los ripios vienen humectados por éstos; es así que esta técnica permite recuperar esta base sintética y limpiar los ripios de cualquier contaminante para que puedan ser procesados y no causen daño severo al medio ambiente.

La desorción térmica es más eficaz en remover hidrocarburos livianos, aromáticos y otros compuestos volátiles que los hidrocarburos pesados. Además si el suelo es muy compacto, el calor a menudo no llega a entrar en contacto con todos los contaminantes, de modo que es difícil que se evaporicen. La desorción térmica no es buena opción para tratar contaminantes tales como metales pesados, que no se separan fácilmente de la tierra contaminada y ácidos fuertes que pueden corroer el equipo utilizado para el tratamiento.

Figura 19.Planta de desorción térmica



Fuente: <http://www.emgrisa.es>

3.2.2.1 Metodología. El proceso consiste en dos etapas, siendo la primera calentar indirectamente los ripios húmedos (humedad no mayor al 15%), es decir, donde los ripios no están en contacto directo con el fuego, estando la fuente de calor en la parte externa de la unidad alimentada por diesel, para con esto volatilizar los hidrocarburos del sistema base sintética.

La segunda etapa consiste en enfriar el proceso de emisión de gases y condensarlos en forma líquida, donde en el condensado se separa petróleo, agua y pequeñas cantidades de sólidos fraccionados. Los gases son primeros enfriados para después ser conducidos al condensador donde se alcanza temperatura ambiente, a ésta temperatura la base parafina es condensada y capturada en un flujo líquido, indicando que la base sintética es filtrada y reciclada.

3.2.2.2 Parámetros de operación. Se debe tener en cuenta los siguientes parámetros para la operación del equipo:

Temperatura de tratamiento: para esto se debe conocer qué tipo de contaminante se va a tener en el suelo, cuál sería su concentración y además para determinar la existencia de peligro de explosión de estos en presencia de calor o fuego se deben considerar los diferentes puntos:

- Punto de ebullición
- Punto de inflamación
- Límite de explosividad superior
- Límite de explosividad inferior
- Tiempo de residencia del suelo en la unidad
- Tipo de calentamiento
- Modo de operación

3.2.2.2.1 Post tratamiento para el uso de la tierra. El ripio una vez tratado es utilizado en los siguientes procesos:

- Ingeniería que es aplicada en terrenos de llenado.
- Mezclado con material estabilizado para luego ser usado como base para carretera para incrementar la fuerza de la estructura.
- Se forman bloques de cemento para proyectos de construcción.

3.2.2.2.2 Post tratamiento para el uso del petróleo. El petróleo una vez que ha sido separado del ripio se lo utiliza para lo siguiente:

- Como base para los fluidos de perforación base aceite.
- Como combustible para los quemadores para el proceso térmico.
- Como combustible para otros procesos industriales.

3.2.2.3 Ventajas

- El petróleo puede ser recobrado y reciclado dentro del lodo de perforación o como combustible para procesos térmicos.

- Este primer punto ayuda a disminuir costos, pues si se considera un estimado de 3.3 MM dólares por costo del servicio, pero se estima un ahorro de 1.6 MM dólares por recuperar la base sintético el costo neto por el servicio sería de 1.7 MM dólares.
- Las unidades móviles pueden ser operadas en locación, reduciendo el almacenamiento de cortes y costos de transportes y además esta técnica permite a la operadora perforar en áreas sensibles.
- No requiere un sistema de tratamiento de agua y genera un porcentaje por debajo de 1% de sólidos en el petróleo recobrado, el cual compensa los costos operativos.
- El diseño de la planta puede ser portable o estacionaria.

3.2.2.4 Desventajas

- Es un método solo para lodos y ripios base aceite sintético.
- La planta no reduce el contenido de petróleo por debajo del 1% y aún queda un desperdicio especial.
- Bajo volumen de procesado de 3 - 6 toneladas por hora.
- Es uno de los procesos de tratamiento más caro.
- Potencial concentraciones de metal pesado provoca problemas para la clasificación de desperdicios.
- Consume más energía que otros procesos aunque este use petróleo recobrado.

3.2.3 Incineración controlada de ripios de perforación

Los tratamientos térmicos están diseñados para destruir los componentes orgánicos de los residuos. A través de la destrucción de la fracción orgánica y su conversión a dióxido de carbono y vapor de agua, los tratamientos térmicos

reducen el volumen de los residuos y ayudan a disminuir la amenaza al medio ambiente, ya que los compuestos orgánicos incluyen componentes peligrosos.

Una buena combustión representa una buena oxidación de los componentes orgánicos (sólidos, líquidos y gases). Para conseguirlo, el aire, que contiene 21 % de oxígeno, debe mezclarse perfectamente con carbono y el hidrógeno del combustible (residuo) para producir estequiométricamente dióxido de carbono y agua. En un sistema completamente homogéneo (un reactor bien agitado) que requiere tanto tiempo como turbulencia, la oxidación completa del carbono e hidrógeno ocurrirá a una temperatura determinada.

3.2.3.1 Características básicas del equipo de incineración y sistema de tratamiento de gases. El equipo de incineración, consta de una primera cámara que opera a 800 °C como promedio, en la cual se efectúa la gasificación, y de la cual los gases producidos pasan a una segunda cámara (cámara de postcombustión) cuya temperatura mínima es de 1000 °C, en esta se realiza una oxidación agresiva de dichos gases. Estas dos cámaras poseen controladores de temperatura apropiados

- Temperatura de combustión > 850 °C
- Temperatura de post-combustión:
- T > 850 °C (residuos peligrosos no halogenados)
- T > 1000 C (residuos peligrosos halogenados)
- Permanencia en postcombustión > 2 segundos (diseño)

Luego se tiene una primera torre de lavado en donde se realiza un enfriamiento del gas en forma muy rápida, casi instantánea, bajando la temperatura desde 800°C a menos de 250°C. En esta torre se inyecta una solución (liquido de lavado). A continuación se tiene una segunda torre de lavado, en la cual se realiza una alcalinización del gas para eliminar los posibles gases ácidos formados. De

igual manera en esta torre se inyecta la misma solución (líquido de lavado). Finalmente el gas sale a la atmósfera conducido por la chimenea en donde se observa un penacho blanco de vapor de agua.

En los procesos de enfriamiento y neutralización antes descritos se generan aguas de lavado residuales, las cuales son conducidas a la zona de tratamiento de aguas, en donde se realiza un acondicionamiento del pH de las mismas y se las deja reposar. Se obtiene una fase líquida que es retornada a los reservorios de las torres de lavado para su re-uso y, una fase sólida la cual es secada y dispuesta en el vertedero de seguridad disponible en planta.

Las cenizas producto de la incineración son enfriadas y confinadas en el vertedero controlado construido para el efecto, previo chequeo del pH de las mismas, luego estos son estabilizados.

3.2.3.2 Metodología. Se introduce el material contaminado en el incinerador y a fin de aumentar la cantidad de químicos nocivos destruidos, los técnicos controlan la cantidad de calor y de aire en su interior. A medida que los contaminantes se calientan, se transforman en gases que pasan a través de una llama. Gracias a la llama, los gases alcanzan una temperatura lo suficientemente elevada que provoca su descomposición en componentes de menor tamaño. Estos se combinan con oxígeno para formar gases menos nocivos y vapor de agua (combustión).

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

El suelo o la ceniza remanente después de la incineración se puede eliminar en un vertedero o enterrar en el sitio. La cantidad de material que requiere eliminación es muy inferior a la cantidad inicial de material contaminado.

3.2.3.3 Ventajas

- Los residuos incinerados reducen su volumen 10 veces.
- Una tonelada de residuos requiere aproximadamente un volumen de 1.4 m³ en un relleno, después de la incineración requiere 0.14 m³.
- 1000 kg de residuos reducen su peso a 333 kg lo que significa 1/3 del peso original.
- Las cenizas residuales son estériles y no putrescibles (también en otros países se utilizan para la industria de la construcción).

3.2.3.4 Desventajas

- Requiere tratamiento posterior de agua proveniente de los procesos de enfriamiento y neutralización que generan aguas de lavado residuales.

3.2.4 Solidificación/Estabilización de cortes de perforación

Este procedimiento inmoviliza o encapsula los componentes del desecho en una forma solidificada a manera de prevención a la contaminación del agua y tierra.

Primero la solidificación consiste en mezclar suelo contaminado con una sustancia como el cemento, que provoca el endurecimiento del suelo. La mezcla forma un sólido que puede dejarse en el lugar o transportarse a otro sitio. El proceso de solidificación impide que el químico se disperse en el ambiente circundante. El agua de lluvia no puede disolver los químicos al atravesar los suelos o lodo tratado. La solidificación no elimina los químicos nocivos, si no que los atrapa en el lugar; el segundo “estabilización”, se refiere a la inmovilización de los

componentes mediante alteración química para formar compuestos insolubles o mediante el entrapamiento del producto solidificado con silicato.

En algunas circunstancias los métodos de solidificación/estabilización pueden requerir que el suelo sea excavado. A veces, el suelo o lodo contaminado se extrae y coloca en grandes mezcladoras en la superficie. La mezcladora combina el suelo o lodo con los materiales de tratamiento, como cemento y cal. Entonces, el suelo o lodo tratado pueden ser colocados nuevamente en el sitio o depositados en un vertedero controlado.

En otros sitios, en lugar de excavar el suelo o lodo, los materiales de limpieza se pueden mezclar directamente bajo tierra. La mezcla se prepara con el uso de grandes paletas rotatorias. Luego, el suelo o lodo tratado que queda en el sitio se cubre con suelo limpio o un pavimento.

3.2.4.1 Ventajas

- Tratamiento directo de los cortes con el material.
- Fácil manejo, mínima logística.
- Acarrea bajos costos para el proceso de cortes.
- Es beneficioso para cortes base agua.
- Bastante estabilidad del producto tratado.
- Permite altos volúmenes del material para mezclar con los cortes y para luego ser expulsados.

3.2.4.2 Desventajas. Puede solamente procesar cortes con bajas concentraciones de hidrocarburos.

3.2.5 Estabilización de cortes con cal viva

La cal viva es utilizada en el tratamiento de ripios de perforación para encapsular los cortes y evitar el arrastre de lixiviados.

3.2.5.1 Metodología. Los cortes se estabilizan con cal viva, ya que esto permite que se retire humedad y el material quede encapsulado con carbonato de calcio. Este proceso de estabilización es útil para cortes base agua y pequeñas cantidades de contenido de aceite o ACPM. No se recomienda usar cal viva para cortes base aceite ya que el proceso con el tiempo no es estable y se produce lixiviación de hidrocarburos. El criterio básico del proceso de estabilización consiste en que los cortes se mezcle fuertemente y continuamente con la cal, (1 ton/100 bbls aproximadamente) hasta que el óxido de calcio pase a carbonato de calcio. En este proceso se toma CO₂ atmosférico y se hace reaccionar con la cal viva (CaO) para obtener carbonato de calcio. En campo una indicación clara de que el proceso es completo es que luego del tratamiento de mezcla y aireación, el material lixivia agua limpia espontáneamente.

3.2.5.2 Sistemas de mezclado. Los cortes generados son llevados a superficie por el lodo de perforación, el cual hace su descarga en el equipo de control de sólidos. Este equipo está conformado básicamente por zarandas que separan los cortes más grandes, limpiadores de lodo que separan los cortes que no pudieron ser retirados por los equipos anteriores, y centrifugas que son utilizadas para la separación de sólidos de baja gravedad y recuperación de material pesante. El procedimiento más adecuado para mezclar los cortes con la cal viva es aquel que permite continuidad y evita cuellos de botella en la operación. Esto significa que debe tener el mínimo número de pasos en el proceso para hacerlo más eficiente, evitar la acumulación de cortes en el área de trabajo para no verse en la obligación de sacrificar rata de penetración especialmente en formaciones geológicas blandas por el alto volumen de cortes. Además el riesgo de accidentes

disminuye cuando el proceso involucra menos pasos. También es importante que la elección del sistema de mezcla asegure que el impacto ambiental sea mínimo. Hay varios sistemas utilizados para realizar la fijación de cortes de perforación con cal viva, dos de ellos son:

A. Tanque de doble tornillo sin fin

Este sistema consta de dos tornillos helicoidales, que se mueven en direcciones opuestas, impulsados con motores eléctricos. Allí los cortes son mezclados con cal viva en la concentración requerida. Deben tener una abertura adecuada debidamente protegida con varillas para recibir todo el material descargado. Deben contar además con pasillos y barandas de protección iguales a las utilizadas en los sistemas de tornillos convencionales. Todas las partes móviles deben tener guardas de protección.

Los controles eléctricos de este tipo de tanques deben ser instalados en la parte lateral del mismo, y deben permitir una adecuada visibilidad de los tornillos mezcladores.

Ventajas

- Mezclas homogéneas.
- Almacenamiento de contingencia.
- Mezcla continua.
- Bajo contacto de los operadores con la cal viva.
- Fácil manejo y reparación.
- No requiere ejecución de obras civiles.

Desventajas

- Alto riesgo de accidentes.
- Punto fijo de descarga.
- Posibles derrames por problemas mecánicos en los tornillos.

- Si la zona de disposición es lejana, requiere dos o más volquetas permanentemente para el transporte de cortes.

B. Carro mezclador

Cuando la limitante es la cantidad de cortes producidos, se dificulta la utilización del sistema anterior, por lo que es necesario pensar en sistemas que manejen mayores volúmenes y que garanticen la misma calidad del corte tratado. Tal es el caso de los carros mezcladores, que poseen un tambor de movimiento rotacional con aspas en su interior el cual recibe los cortes junto con la cal en la concentración apropiada.

Ventajas

- La mezcla es muy homogénea.
- Maneja grandes volúmenes.
- Puede ser transportado fácilmente, luego la mezcla puede ser realizada en la descarga del equipo de control de sólidos o en el sitio de disposición de cortes.
- Mayor control de dosificación de cal viva.

Desventajas

- Contacto directo de los operadores con la cal viva.
- Requiere un sistema de almacenamiento adicional.
- Emanación de vapores tóxicos.
- No es un sistema continuo

3.2.5.3 Parámetros de calidad para la cal viva. La cal viva usada para la fijación de cortes base aceite y fluidos residuales debe estar deshidratada y ser por lo menos ochenta por ciento (80 %) de óxido de calcio activo, característica que debe controlarse en campo mediante la prueba de óxido de calcio activo. La cal viva no debe contener metales pesados en concentraciones mayores a las que aparecen en la tabla 3.

Tabla 3. Concentración máxima de metales pesados en la cal viva

Contaminante	Concentración máxima mg/lit.
arsénico	5,0
bario	100,0
cromo	5,0
mercurio	0,1
Plata	5,0
plomo	5,0
Selenio	1,0

Fuente: <http://www.lalibreriadelau.com>

3.2.5.4 Proporciones de mezcla. El proceso de fijación de los cortes base aceite con cal viva no retira los hidrocarburos contenidos en los cortes, pero sí los estabiliza. La estabilización del aceite contenido en los cortes se logra por adsorción en el producto reaccionado de cal hidratada. Los cortes deben estar fijados con cal viva hasta el punto en que estén estabilizados por la reacción de la cal viva y del agua para formar cal hidratada.

Para cada porcentaje de aceite es requerido un porcentaje de agua, con el fin de que la cal reaccione con el aceite y lo fije por adsorción. Los porcentajes de cal viva y de agua más utilizados con respecto al porcentaje de aceite en los cortes aparecen en la tabla 4, como una guía en el momento de calcular la cantidad de cal que se debe utilizar en la mezcla.

Tabla 4. Proporciones de mezcla (todos los porcentajes son en peso)

Contenido de aceite (%)	Cal viva al 80% requerida	Agua requerida (%)
<5	15-20	7
5-10	20-25	8
10-20	40-45	15
20-30	60-65	21
30-40	80-85	28

Fuente: <http://www.lalibreriadela.com>

El porcentaje de aceite y de agua en los cortes, antes del proceso, se debe estimar haciendo un ensayo de laboratorio denominado la prueba de la retorta. Este consiste en calentar un determinado volumen de cortes en un recipiente aforado, hasta lograr separar las fases líquida y sólida presentes en los cortes. El porcentaje de aceite se determina como el porcentaje por peso de aceite en los cortes en relación con el peso de los cortes secos y el porcentaje de agua se calcula como el porcentaje pesado de agua en los cortes en relación con el peso de los cortes secos. Los datos de la tabla 4 deben ajustarse cuando la pureza de la cal viva esté por debajo del 80% o el porcentaje de agua en los cortes sea mayor que el requerido.

4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN NO CONVENCIONALES APLICADOS A LA INDUSTRIA

La preservación del medio ambiente es una de las causas principales que impulsa la investigación y el desarrollo de los fluidos de perforación hoy en día. El cuidado de la salud del personal que trabaja en estas actividades petroleras es también un motivo importante que influye en la utilización de estos fluidos, procurando seleccionar los productos de forma tal de minimizar los riesgos de la salud. Los sólidos que se extraen del pozo deben tratarse junto con los fluidos de perforación. Mientras el daño al medio ambiente en el sitio del pozo es relativamente pequeño, en los alrededores de la operación de perforación el impacto ecológico puede ser muy grande, por ello actualmente existen muchos métodos para el tratamiento y disposición de estos pero algunos de estos métodos son poco conocidos.

4.1 REINYECCIÓN DE CORTES DE PERFORACIÓN (CUTTING RE-INJECTIONS) CRI

Esta tecnología elimina cortes de perforación base aceite o sintética tanto en ambientes costa fuera como terrestres.

La reinyección de ripios requiere un sistema capaz de enviar hasta el fondo del pozo los volúmenes de fluidos requeridos y generar presiones adecuadas. Además la tubería del pozo tiene que estar diseñada para soportar altas presiones de inyección y el anular del pozo seleccionado para el proceso debe estar adyacente a la formación de alojamiento seleccionada.

El proceso de reinyección de cortes ha comprobado ser una solución efectiva para la eliminación de cortes de perforación. Los costos de la eliminación de residuos en zonas remotas o ambientalmente sensibles son muy altos, en estas la reinyección de cortes es el único método de eliminación ambientalmente aceptable. Al eliminar la necesidad de acumular, almacenar y transportar los recortes a tierra para su tratamiento, las operadoras ahorran tiempo, esfuerzo y espacio en el equipo de perforación. Algunos de los factores clave en la obtención de estos beneficios son el manejo y preparación efectiva de los cortes antes de su reinyección.

El sistema permite que las operadoras:

- Reinyecten en pozos de producción existentes
- Perforen y reinyecten simultáneamente
- Inyecten en pozos existentes o en pozos de eliminación de recortes dedicados.

Cuando los lodos en base de aceite son utilizados en las operaciones de perforación, los cortes de roca se recubren con una capa residual de aceite y deben ser desechados de una manera ambientalmente viable. Se han utilizado varios métodos para manejar estos desechos: reducción de la fuente, reciclaje o recuperación, re-uso, tratamiento y disposición. La reducción de la fuente consiste en optimizar el control de sólidos y el manejo de fluidos, para reducir así el material contaminado.

También se pueden reciclar y volver a usar los fluidos de perforación o de completación y además utilizar los cortes para construcción de carreteras, si esta opción es factible y ambientalmente viable. Se han creado también varios procesos de tratamiento de materiales contaminados para reducir el porcentaje de aceite en ellos, tal como la filtración, la centrifugación, la biorremediación, la incineración y la desorción térmica, técnicas menos eficientes y más costosas que la reinyección de cortes.

Los cortes generados durante las operaciones de perforación llegan a la superficie transportados por el lodo utilizado. Esta mezcla pasa por un proceso de control de sólidos donde se recupera parte del lodo y los sólidos son separados y almacenados en tanques, cajas o estanques, según las condiciones de espacio del taladro. Este material, reducido a un determinado tamaño de partícula, se mezcla con agua y viscosificadores en una unidad de mezcla para crear la lechada

La lechada se transfiere a un tanque de almacenamiento temporal donde se chequean sus propiedades reológicas, que deben cumplir los requerimientos de ingeniería. La lechada es inyectada por el tubular o por el anular a una formación receptora a una presión, tasa de bombeo y condiciones reológicas óptimas para crear fracturamiento hidráulico en la formación y allí almacenar los sólidos.

Se pretende entonces crear un sistema de fracturas donde se almacenen los cortes para evitar así cualquier contaminación en la superficie. La determinación de esta zona de creación de fracturas, de recepción y acumulación de sólidos depende de la información relativa al campo en estudio.

La reinyección de cortes se puede hacer simultánea a la perforación o a la producción, mediante alguno de los anulares del pozo, o si el pozo es destinado exclusivamente a reinyección se puede utilizar el tubular. La decisión de cómo llevar a cabo el proceso de reinyección de cortes depende de la planeación del campo a desarrollar por parte de la operadora, y de los resultados de los estudios de ingeniería para verificar la factibilidad del proceso.

El éxito de las operaciones de CRI depende del estudio y análisis del campo donde se va a desplegar el proceso, de la evaluación de las opciones y de los riesgos probables y del desarrollo de un proceso de manejo de riesgos para evitar cualquier eventualidad.

Los objetivos de un estudio de ingeniería para operaciones de CRI incluyen selección de zonas geológicas adecuadas, realización de simulaciones numéricas de fracturamiento hidráulico, análisis de las condiciones del pozo, identificación y mitigación de riesgos, recomendaciones operativas, diseño piloto de inyección y sistema de monitoreo.

4.1.1 Selección de zonas

Con toda la información disponible del campo, se identifica y evalúa la conveniencia de las formaciones geológicas candidatas para la inyección de desechos. La evaluación geológica básica identifica zonas potenciales de inyección. El criterio de evaluación se basa en la capacidad adecuada de almacenamiento para el volumen de desechos de perforación proyectados, en que las fracturas generadas no intercepten pozos cercanos, en la inhibición del crecimiento vertical y en el control del crecimiento lateral de la fractura.

El riesgo más prominente de la creación de fracturas hidráulicas es la extensión de estas hasta la superficie o hasta acuíferos, donde el material inyectado podría alcanzar estos niveles. En el modelo geológico se debe verificar la existencia de una formación de arresto de fracturas y selladora de formación, así como una formación de contención de desechos y una zona de inyección de cortes o zona objetivo.

4.1.2 Simulaciones numéricas

A partir del modelo geológico creado de la información del campo, se realizan simulaciones numéricas de operaciones de inyección de desechos, dando como resultado la estimación del crecimiento lateral y vertical de la fractura y la predicción de la contención del material inyectado. Además, se estima también la inyectividad de la formación y la capacidad de almacenamiento de desechos.

La creación de fracturamiento en la formación se debe a la inyección de cortes de perforación y se simula por medio de un modelo geomecánico totalmente tridimensional de fractura hidráulica, usado para inferir las dimensiones máximas posibles de la fractura y proporcionar ayuda para desarrollar los parámetros adecuados de inyección.

4.1.3 Análisis de las condiciones del pozo

El pozo potencial de reinyección de cortes debe obedecer a criterios como las recomendaciones específicas de campo, la ausencia de problemas logísticos y que el pozo esté adecuadamente distante de otras operaciones de producción e inyección que representen un riesgo mínimo de que el inyectante alcance pozos cercanos. Además, el pozo y las fracturas creadas deben distar de riesgos geológicos como fallas y acuíferos.

Es necesario, además, determinar factores técnicos relativos al pozo como la condición de la sarta, de los revestidores, de los trabajos de cementación, de la condición de la completación, de la longitud del intervalo de perforación, etc. En este sentido se hacen recomendaciones de estrategias de recompletación o completación apropiadas, requerimientos de equipo, parámetros operativos y pautas de supervisión que pueden ser implementadas por un mínimo capital y costo operativo.

4.1.4 Identificación y mitigación de riesgos

Incluso en las operaciones mejor planificadas y ejecutadas pueden ocurrir fallas. Por consiguiente, los riesgos potenciales importantes deben identificarse de antemano y su impacto en HSE y en el modelo económico debe ser evaluado. En este sentido, se establecen planes y procedimientos de manejo del riesgo para evitar problemas posibles o minimizar su impacto.

En la mayoría de los casos, los programas de CRI se realizan sin ningún problema serio. Sin embargo, en varias ocasiones las empresas operadoras han sido multadas por su falta de control en las operaciones de CRI, y los permisos de inyección se han revocado, impactando de esta manera todo el programa de perforación. Además, siendo el proceso de CRI un sistema en cadena, cualquier falla evita el progreso continuo de las operaciones de perforación, frena el proceso y aumenta los costos del proyecto. Por estas razones, es evidente la necesidad de un estudio detallado de ingeniería que especifique los riesgos asociados a la reinyección de cortes y desarrolle métodos de prevención de fallas.

Adicionalmente, se recomienda un plan continuo de monitoreo durante las operaciones de CRI para que cualquier riesgo se identifique en avance y los planes de mitigación sean implementados.

4.1.5 Recomendaciones operativas

Las recomendaciones operativas también son parte del manejo de riesgos de los trabajos de CRI y se estipulan en los estudios de ingeniería. A continuación se especifican algunos de los parámetros operativos que se deben discutir y establecer antes de la operación de CRI.

- **Diseño de equipo de superficie.** El despliegue del equipo de superficie necesario para la operación de CRI se realiza a partir de los parámetros de ingeniería obtenidos y de las condiciones del taladro.
- **Concentración de los sólidos.** Como medida preventiva para una disposición segura e ininterrumpida de cortes, el contenido de sólidos no debe exceder generalmente de 20% por volumen de la lechada, aunque esto se especifica según las condiciones de cada proyecto.

- **Reología de la lechada.** Es necesario controlar la viscosidad y tasa para que los cortes entren en la fractura y se desplacen sin interrupción a lo largo de su longitud.
- **Clasificación de partículas según tamaño y trituración.** El análisis de distribución de partículas por tamaño es altamente recomendado para evitar problemas de asentamiento y, por consiguiente, de taponamiento del pozo.
- **Especificaciones de cabeza de pozo.** A partir de las simulaciones numéricas se estima la presión de inyección de superficie, la cual especifica los requerimientos de equipo de inyección.
- **Evaluación de estallido tubular.** Los cálculos de estallido tubular establecen la máxima presión de inyección en superficie para no exceder los límites de la tubería.
- **Evaluación del desgaste por erosión.** La erosión de la cabeza de pozo y del tubular puede ocurrir durante la inyección prolongada de la lechada, por lo cual se debe estimar este desgaste e identificar los riesgos asociados.

4.1.6 Programa piloto de inyección

Antes de realizar una inyección de cortes, se debe verificar la inyektividad de la formación. Se procede entonces a hacer una inyección piloto donde un fluido viscosificado simula las características de la lechada y confirma si la operación va a ser segura y exitosa.

Se hacen, además, pruebas de decaimiento de inyección para inferir el estrés in situ y los parámetros de pérdida de fluidos, así como la evolución progresiva de la fractura y la geometría potencial del dominio de la disposición.

4.1.7 Recomendaciones de monitoreo

Un programa de monitoreo bien planificado debe ser establecido para identificar signos de advertencias tempranas, que confirmen los parámetros operacionales y los procedimientos correctos. Para ello, se implementan herramientas de diagnóstico y se proporcionan señales tempranas de advertencia, que incrementan el aseguramiento de la calidad y el cumplimiento de los requisitos del regulador.

Generalmente, se requiere un monitoreo de la presión de inyección de superficie en la cabeza de pozo. También se necesita la supervisión de la presión anular si las condiciones de la tubería de inyección y del revestidor son inciertas. Estos datos se monitorean cuidadosamente durante la operación y son analizados con más detalle para controlar el fracturamiento hidráulico a largo plazo y llevar un historial del pozo.

En cuanto a la lechada, deben monitorearse parámetros como volumen de cortes, fluido usado, densidad, viscosidad, tasa de inyección y tiempo de inyección durante cada episodio, temperatura y aditivos.

La erosión causada por la reinyección de cortes es monitoreada con cupones de metal puestos en las curvaturas de la cañería de inyección y la erosión de los cupones se determina periódicamente.

Otras formas de monitoreo incluyen registros de temperatura y registros de rastreo. Los registros de temperatura pueden revelar la altura de la fractura a lo largo del pozo. Los registros de rastreo pueden descubrir cualquier migración de la lechada detrás del revestidor por microfracturas o pobre cementación. Los registros de rastreo también pueden sugerir si partes de los intervalos perforados se han taponado.

En conclusión, la reinyección de cortes es una metodología práctica, exitosa, segura y poco costosa para desechar los materiales contaminados de las operaciones de perforación, siempre y cuando se sigan las recomendaciones de ingeniería establecidas para el campo en cuestión. El proceso ofrece un plan de manejo y prevención de riesgos que, ejecutado según especificaciones, alcanzará la meta de cero descarga para las compañías operadoras y la aprobación de las autoridades ambientales y gubernamentales.

4.2 TRATAMIENTO POR MICROONDAS DE CORTES DE PERFORACIÓN CONTAMINADO CON PETRÓLEO

Las actividades de perforación costa afuera que emplean lodos base aceite generan recortes de perforación contaminados que contienen entre un 10-15% en peso de aceite. El uso de este tipo de lodos es muy beneficioso y en muchas operaciones de perforación en aguas profundas es casi obligatorio. Este tipo de operaciones produce con ella gran cantidad de productos de desecho. La recuperación y la eliminación de estos se ha convertido en un costo importante en la producción de pozos en alta mar, particularmente en el mar del Norte, donde se introdujo la legislación para reducir el contenido de aceite a <1% antes de la eliminación.

Las tecnologías actuales para el tratamiento de cortes de perforación en alta mar tienen grandes carencias y como resultado, los recortes son eliminados in situ a través de la re-inyección, o enviados a tierra para su tratamiento térmico. En la costa el tratamiento de re-inyección o el enterramiento no es deseable debido a los gastos importantes de transporte de los recortes de la costa y en algunos casos poco práctico debido a las inclemencias del tiempo que existe en los lugares de la costa.

Por lo tanto, hay obvias razones de seguridad y de costos en el tratamiento de los cortes, para continuar en la búsqueda de un tratamiento que me permita disponer los cortes provenientes de las actividades de perforación desde mi plataforma y requiera un mínimo de espacio y energía, ese es el caso del tratamiento de cortes de perforación mediante microondas.

Este tipo de tratamiento ha sido desarrollado para la recuperación de recortes de perforación contaminados offshore, es decir, en plataformas petroleras costa afuera, con la ventaja que este proceso requiere una demanda mínima de energía y de muy poco espacio.

4.2.1 ¿En qué consiste esta tecnología?

En el proceso se separa el aceite contaminante de los cortes de perforación, dando lugar a un material inerte sólido y un producto de petróleo que pueden ser reutilizados en el sistema de lodo.

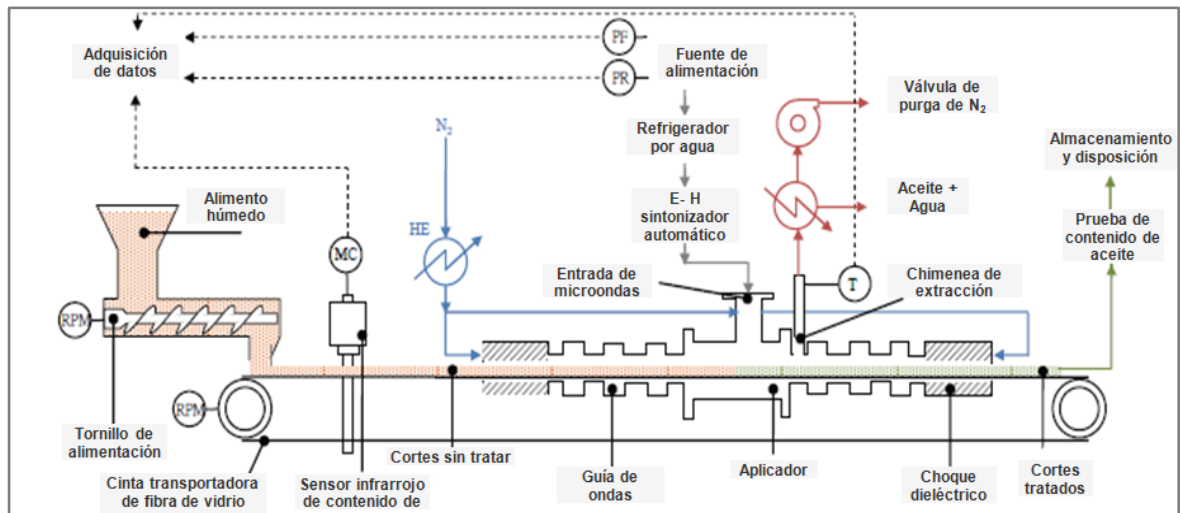
El proceso puede remediar los cortes hasta llevarlos a un valor por debajo de 0,1% de contenido de aceite. Los mecanismos de calentamiento obtenidos con el tratamiento por microondas son únicos, es decir, que el petróleo que se extrae no se degrada como es el caso de la desorción térmica convencional o mediante procesos mecánicos. Los requerimientos de energía son significativamente menores que las tecnologías actuales.

Este proceso podría reemplazar los tratamientos de cortes de perforación realizados en operaciones costa afuera, y proporcionar una opción de recuperación con un requerimiento de energía y CO₂ significativamente menor a las tecnologías existentes.

4.2.2 Metodología experimental

El sistema de microondas consta de un especial diseño transversal ondas-campo de aplicador de microondas con secciones de asfixia a ambos lados, que limita la propagación de microondas en el medio ambiente. Un aplicador de onda es un aplicador de resonancia que soporta múltiples zonas de alta intensidad de campo de una manera controlada. El arreglo de túnel permite a una cinta transportadora de fibra de vidrio que se inserte y que continuamente puede pasar con materia prima fresca a través de la zona del campo de microondas de alta cuando el tratamiento se produce. Un sintonizador de E / H fue empleado para que coincida con la impedancia de las microondas con la de la cavidad para maximizar el suministro de energía en las muestras y minimizar la potencia reflejada. Cualquier potencia reflejada es absorbida por un sistema de recirculación refrigerada por agua que protege el magnetrón de exceso de potencia reflejada. Para activar el proceso de supervisión de la unidad a escala piloto éste está equipado con un registrador de datos que registra el incidente y refleja el calor y la temperatura del vapor en el punto de extracción. Un analizador no intrusivo por infrarrojos se montó encima del transportador de cortes inmediatamente después de la tolva de alimentación para permitir el monitoreo del contenido de humedad del alimento y registrarlo. En la figura 20 se ilustra el esquema del sistema.

Figura 20. Diagrama esquemático del sistema de tratamiento por medio de microondas



Fuente: SPE 127064

El sistema de suministro de alimentación consta de una tolva de alimentación con un mezclador de doble eje que alimenta a una cinta transportadora en forma de artesa. La velocidad de alimentación de la tolva y la velocidad de la cinta pueden ser variada por lo que la profundidad y el rendimiento puede ser controlada. Una corriente de nitrógeno precalentado se introduce en la cavidad en tres puntos y actúa como un gas de barrido, así como proporcionar una atmósfera inerte para evitar la combustión de los vapores de aceite. También previene la condensación de vapor en el espacio de cabeza por encima del material tratado. Los vapores de los materiales tratados se retiran de la cavidad mediante un sistema de extracción a través de un condensador, donde se puede tener aceite y/o agua condensada los cuales se recuperan. Los cortes de perforación procesados son dados de alta al final de la cinta transportadora para el muestreo y la eliminación.

4.2.3 Efectos del tipo de material y contenido de agua

Al evaluar el desempeño del sistema de tratamiento por microondas-continua se puede concluir que el contenido de aceite residual y el contenido de agua de los cortes es principalmente una función de la potencia aplicada durante el tratamiento. El contenido de aceite residual disminuye al aumentar la potencia aplicada.

En muestras donde el 1% de aceite residual no se logra, se cree que esto se da sobre todo cuando las materias primas tienen un contenido relativamente alto de agua. Es de destacar que durante pruebas realizadas en laboratorio se observó que cortes con contenido de agua muy similares se comportan de manera muy diferente. En este caso, se cree que se debe al tipo de roca el cual es un factor importante que contribuye además al contenido de agua.

La pizarra por ejemplo consume aproximadamente la mitad de la energía que una arenisca cuando ambas tienen contenido de agua similares. Esto sugiere que las diferentes estrategias de procesamiento son necesarias para diferentes tipos de roca. En el caso de la pizarra (continuando con el ejemplo) durante el calentamiento por microondas el agua se convierte en vapor, que arrastra el aceite a medida que pasa dentro de la estructura de ella y se dirige a la superficie. En el caso de la arenisca, ésta no contiene agua químicamente o capilares dentro de su estructura, en este caso el agua está presente con el aceite en la superficie de los gránulos de modo que el mecanismo de arrastre no será explotado en la misma medida.

4.2.4 Contenido de aceite residual

El contenido de aceite residual es principalmente una función del tipo de aplicación de energía, contenido de agua y la roca por lo tanto diferentes estrategias de procesamiento son necesarias para diferentes tipos de materia prima.

Los requerimientos de energía varían con el contenido de agua y el de tipo de roca, para el caso de cortes arcillosos en particular se requiere más energía para lograr un 1% de aceite residual. El consumo de energía se puede reducir considerablemente mediante la maximización de la densidad de potencia en la fase de calefacción.

4.2.5 Para resaltar

La capacidad del sistema de tratamientos mediante de cortes de perforación contaminados con aceite mediante microondas puede calentar selectivamente los materiales, lo cual lo hace que sea un proceso muy eficiente ya que la energía no se pierde innecesariamente en el calentamiento de todo el material de alimentación como con otros procesos térmicos utilizados actualmente. Esto significa que la mayor parte de la energía es absorbida preferentemente por su contenido de agua, que es la fase más receptiva de microondas en la mezcla.

4.3 VERMICOMPOSTAJE

La exploración de petróleo y gas en áreas de creciente sensibilidad ambiental requieren una justificación de la técnica elegida como la mejor disponible, incluyendo la eliminación de residuos de perforación.

En las zonas sensibles en alta mar del Norte de Noruega la descarga de recortes de perforación es un tema controvertido. Por tal razón se esperan mejoras en las técnicas de manipulación y tratamiento de residuos para permitir que los desechos regresen a la costa de forma rápida y segura para su tratamiento. Si los cortes no son inyectados en las formaciones del subsuelo en alta mar, el tratamiento térmico es una opción. Sin embargo, estas plantas requieren una inversión considerable de capital o el transporte de los recortes de larga distancia a la siguiente planta. Mientras que la biorremediación puede no ser la mejor opción para el tratamiento de residuos en los climas árticos, el uso de fluidos benignos diseñados para facilitar la biorremediación puede aumentar las tasas de proceso y facilitar el reciclaje de los residuos. Los ensayos de campo demuestran que el vermicompostaje es apto para este propósito.

4.3.1 ¿De qué se trata?

El vermicompost (del latín vermis, es decir, gusano), es el producto resultante del proceso de digestión de restos orgánicos que ingieren las lombrices del compost ayudadas por otros microorganismos. Es un material homogéneo, orgánico y oscuro y que es útil como abono para las plantas. Esta técnica es ampliamente utilizada actualmente para la minimización de residuos, siempre de origen orgánico.

El vermicompostaje también conocido como lombricultura, es un método bien establecido de tratamiento de residuos orgánicos, pero sólo recientemente ha sido aplicado a los fluidos de perforación. La interacción entre los gusanos, bacterias y hongos facilita la degradación del contenido de aceite de los residuos hasta alcanzar concentraciones naturales. El producto resultante es un compost de alta calidad que ha demostrado que funciona como fertilizante y mejorador de suelo.

En nuestro caso en particular se propone el vermicompostaje como una posible solución al problema relacionado con el tratamiento y disposición de cortes de perforación. El vermicompostaje utiliza gusanos para reparar los cortes y convertirlos en un tipo de material de composta que se puede utilizar como un potenciador de la tierra o los fertilizantes. Esta es una técnica que no sólo limpia los cortes, sino que también les añade valor, convirtiéndolos en un recurso valioso. Esta metodología se basa en una constante búsqueda basada en la minimización de residuos.

Reconociendo que este método transforma un residuo en un abono, se puede argumentar que esta es una técnica de minimización de residuos atractiva que requiere pocos insumos de energía y no deja residuos ambientalmente peligrosos.

4.3.2 Resultados

Esta técnica ha sido aplicada a escala de campo en Noruega y Nueva Zelanda llegando a las siguientes conclusiones:

- La efectividad del proceso depende de las propiedades químicas del tipo de fluido con el que están contaminados los cortes de perforación.
- La temperatura también es un factor determinante durante la realización de este tratamiento probablemente es el parámetro más difícil de conciliar.
- El costo de la técnica de lombricultura, en comparación con el transporte de larga distancia y el tratamiento térmico de los residuos, es mucho menor.
- Se espera que mediante esta técnica se reduzcan los costos de tratamientos entre un 50% y 70%.

4.4 EXTRACCIÓN SUPERCRÍTICA DE CO₂ APLICADO A CORTES DE PERFORACIÓN

Como tendencia general en la industria, la legislación medio ambiental es cada vez más estricta. El impacto de la actividad de perforación es en la actualidad cuidadosamente monitoreado y los equipos de ingeniería de perforación deben tener en cuenta aspectos que no estaban tradicionalmente dentro de su ámbito de trabajo y competencia. La reducción de emisiones a la atmósfera, la liberación de fluido de perforación o el tratamiento y disposición final de recortes de perforación se deben tener en cuenta desde el principio de un proyecto. Por supuesto, esto tiene un impacto creciente en el costo total del proyecto.

En los últimos años, empresas especializadas han propuesto muchas mejoras en los sistemas de cortes base agua. Sin embargo, no hay mayor innovación que pueda competir con el rendimiento de un sistema de lodos base aceite.

Cuando se perfora un pozo hasta los límites de la tecnología existente (desviación alta, drenaje horizontal) o cuando la formación perforada es demasiado sensible (la estabilidad de pozo), no hay otra opción que usar un sistema de lodos base aceite.

Los tratamientos que se aplican actualmente a los recortes de lodo base aceite, se pueden clasificar en tres categorías: la inertización, la bio-remediación o limpieza.

Inertización: consiste en la fijación de los contaminantes evitando la lixiviación.

Bio-remediación: permite a los contaminantes ser degradados por la actividad biológica (cultivo de la tierra, bio-reactor).

Limpieza: consiste en separar los contaminantes de su substrato mineral, estos son conocidos actualmente como tratamientos térmicos (incineración, termodesorción) o químicos (uso de disolventes).

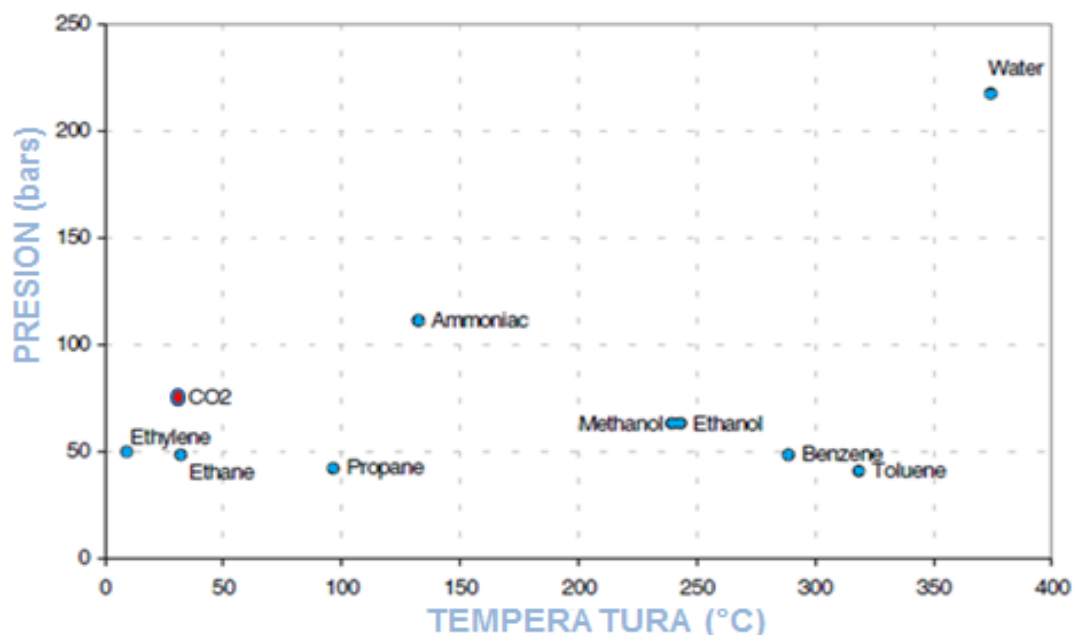
La tecnología de re-inyección no está clasificado como un tratamiento de cortes de perforación: se trata de una solución operativa mediante el cual el control de los contaminantes se ha perdido y además, no permite ningún tipo de control de calidad o el monitoreo del impacto.

La extracción supercrítica de CO₂ pertenece a la categoría de tratamientos de limpieza y podría competir con los tratamientos térmicos actualmente existentes.

4.4.1 Propiedades del CO₂ supercrítico

Todos los fluidos supercríticos presentan un dominio (figura 21). Muchos presentan similares características solventes, pero su punto crítico podría ser mayor, o su eficacia podría ser menor para similares condiciones de presión y temperatura.

Figura 21. Puntos supercríticos para varias sustancias



Fuente: SPE 63126

Entre todos los fluidos supercríticos, el CO₂ es el más utilizado. Hay varias razones para esto. Su punto crítico (73,8 bares, 31 °C) se aproxima a la temperatura ambiente. Su capacidad disolvente es alta, incluso cuando se coloca justo por encima de la Presión crítica. Es natural, no inflamable, no tóxico, de disponibilidad para aplicaciones industriales y lo más importante de todo es que es económico.

Por encima de 73,8 bares y 35 °C, el dióxido de carbono (CO₂) presenta unas propiedades especiales, tales como alta densidad, alta difusividad y baja viscosidad, pero sobre todo, enormes propiedades solventes no polares con respecto a las moléculas como los hidrocarburos. Este estado especial, a veces denominado cuarto estado de la materia, es ampliamente conocido como el estado supercrítico. El CO₂ en condiciones supercríticas ya es ampliamente utilizado en varios procesos de extracción industrial, tales como granos de café

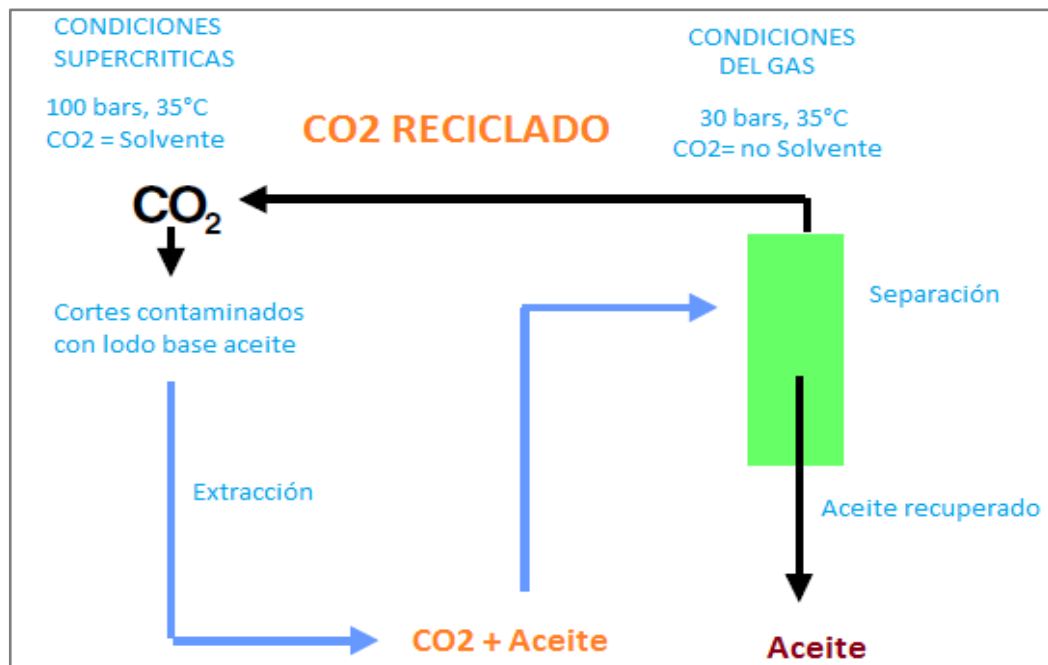
descafeinado, aromas y sabores de selección o producción de moléculas farmacéuticas.

El potencial industrial de esta prometedora tecnología se encuentra actualmente en estudio. La aplicación de esta tecnología podría constituir un avance importante en la industria de la perforación, tanto en tierra como costa afuera.

4.4.2 Limpieza de cortes de perforación base aceite con CO₂ supercrítico.

El proceso general de limpieza cortes mediante de CO₂ supercrítico es conceptualmente simple. Para recortes de perforación de base aceite, que contienen entre 6% y 13% de contenido de aceite dependiendo de su origen y la eficiencia del control de sólidos en la plataforma, se colocan en un cilindro de alta presión. El CO₂ supercrítico se bombea en el cilindro de alta presión donde se disuelve el aceite en los cortes. El CO₂ supercrítico luego sale a través de una válvula reductora de presión y se expande en un separador. En esta etapa, el CO₂ ya no está en condiciones supercríticas, y se produce una separación inmediata entre el petróleo y el CO₂. El aceite es recuperado por la gravedad y el CO₂ se recicla, es decir, se vuelve a comprimir a condiciones supercríticas y se recircula dentro de la célula de alta presión. El principio de operación de este proceso se ilustra en la figura 22.

Figura 22. Principio de limpieza de los cortes de perforación base aceite con CO₂ supercrítico



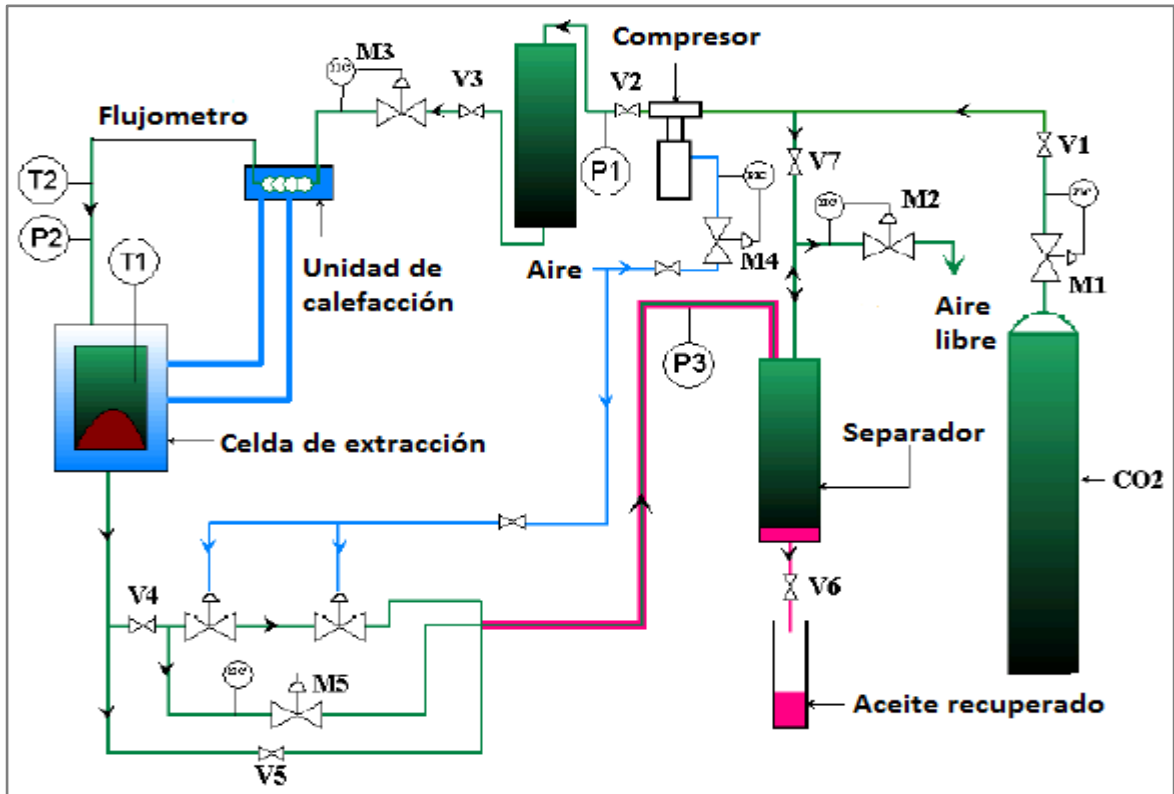
Fuente: SPE 63126

4.4.3 Instalación experimental

Este tipo de tratamiento se ha llevado a cabo en pruebas de laboratorio, obteniendo una cantidad de datos a lo largo de su estudio. La configuración básica ilustrada en la figura 23 ha sido mejorada y presenta las siguientes características:

- El cilindro de extracción es un dispositivo de alta presión y temperatura controlada (500 bares / 250 °C).
- Por lo general el cilindro se llena con 200 g de recortes.
- El sistema de circulación permite que el CO₂ se distribuya de forma continua en la celda.
- Una válvula de alivio ajustable regula la presión de extracción.
- Un máximo de 6 kg / h de CO₂ pueden circular.
- La separación se lleva a cabo en un separador de tipo hidrociclón.

Figura 23. Instalación experimental para la limpieza de cortes base aceite con CO₂ supercrítico



Fuente: SPE 63126

4.4.4 Resultados

Estas pruebas han demostrado que el CO₂ supercrítico tiene el potencial para ser una alternativa técnica viable para la limpieza de los cortes base aceite y las principales conclusiones son las siguientes:

- Cuando el proceso se realiza por encima de la temperatura crítica, un aumento de la temperatura en la celda, no mejora la eficiencia del proceso de limpieza. Por otro lado, un aumento de la presión por encima del punto crítico mejora considerablemente la eficacia del tratamiento. Sin embargo, más allá de 105 bares, el aumento de la presión no mejora la limpieza.
- Las condiciones óptimas son razonables: 35°C y 100 bares.

- El aceite extraído después del tratamiento es estrictamente el mismo que el utilizado para construir el sistema de lodo base aceite. Por lo tanto, el aceite recuperado puede ser completamente re-utilizado sin ningún tratamiento adicional.
- Un alto contenido de agua tiene un efecto negativo en la eficiencia del proceso. Sin embargo, esto no debe constituir un factor limitante en la realidad: ya que generalmente la fracción líquida de cortes apenas supera el 30%, si la separación de sólidos se realiza correctamente en la plataforma.

5. METODO DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACION ENDRILL

Uno de los principales retos de la industria moderna es sustentar sus operaciones bajo el principio de minimizar impactos ambientales y reducir los costos de tratamiento de los desechos generados en sus operaciones. Estos requerimientos han impulsado el desarrollo de tecnologías ambientales que permiten la transformación y uso de los desechos en obras conexas a la industria.

Durante los últimos años se han realizado notables avances en cuanto a las actividades de perforación, que han permitido mejorar la calidad ambiental de los fluidos de perforación, al reducir su toxicidad, mediante formulaciones que incluyen la utilización de aceites minerales y de palma biodegradables, en contraste con el uso de diesel con alto contenido de aromáticos de alta toxicidad. También se ha reducido la presencia de metales pesados tóxicos (As, Cd, Cr, Hg, etc.) significativamente de forma de cumplir con los niveles permisibles, exigidos en la normativa ambiental vigente.

La optimización de la calidad ambiental y de los materiales usados como materia prima en los fluidos de perforación, ha permitido la aplicación de opciones de re-uso y reciclaje de los desechos de perforación, como es el caso de los ripios, formados por recortes geológicos, impregnados en aceites y sales usadas como densificantes. Este es el caso de la tecnología Endrill.

5.1 ¿QUÉ ES ENDRILL?

Endrill es una nueva tecnología que se empezó a implementar en Barinas Venezuela en el año 2001 durante tres años y obtuvo resultados favorables al

reducir considerablemente los impactos ambientales y costos hasta casi un 50%. Esta tecnología permite la transformación de cortes de perforación en materiales con valor agregado, los cuales pueden ser utilizados como relleno de locaciones o llenante de mezclas asfálticas para capas de rodamiento en locaciones asociadas a pozos petroleros en zonas cercanas a cuerpos de agua con un alto nivel freático o en plataformas donde el espacio es limitado.

Las transformaciones físico-químicas y mecánicas realizadas al ripio, permiten pasar de un material sin trabajabilidad a uno con propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la compresión confinada. Estos materiales también cumplen con las especificaciones ambientales como el TCLP (ensayo de Lixiviación) especificado en la normativa ambiental vigente. Estos se pueden considerar como materiales no peligrosos pero no como materiales inertes.

5.1.1 Metodología

Los procesos que emplea la tecnología Endrill son la estabilización/solidificación, usados ampliamente por la EPA (agencia del ambiente americana) en trabajos de remediación de áreas contaminadas y consiste en la utilización de aditivos de aluminosilicatos que inmovilizan y fijan los contaminantes en su forma menos soluble a una matriz sólida por interacción físico-química, impidiendo su migración al ambiente.

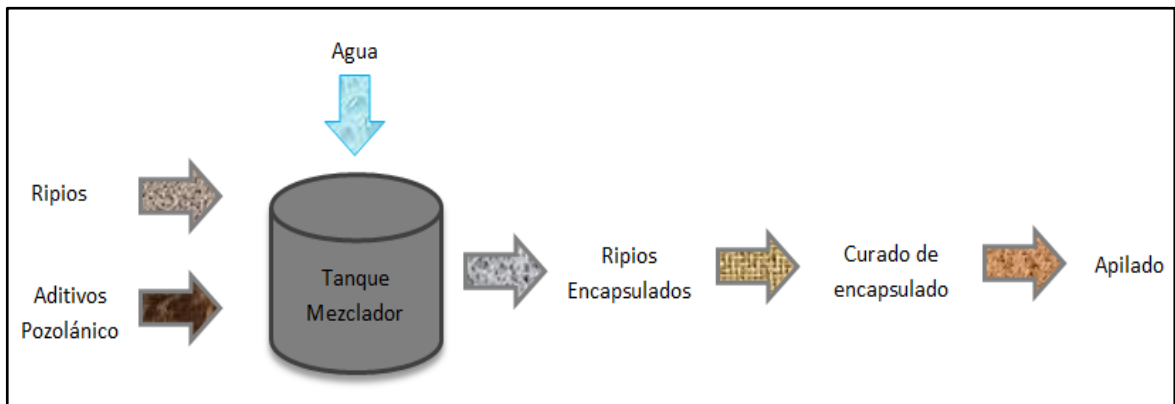
5.1.2 Uso del material encapsulado como sub-base

Después de llevar a cabo la solidificación y estabilización de los cortes de perforación se procede a colocar los encapsulados sobre la base del terreno a rellenar y sobre éste, la capa superficial del material convencional, para construir tramos de prueba para tránsito fluido.

5.1.3 Seguimiento ambiental

Como parte del seguimiento ambiental se deben instalar pozos de monitoreo de agua, en la adyacencia de la localización, donde se empleó el material encapsulado como relleno, con la finalidad de detectar posible migración de lixiviados al ambiente. Luego de transcurrido un par de meses de la colocación del material, se deben captar muestras de agua para el presente estudio.

Figura 24. Procedimiento de campo para tratamiento de ripios de perforación



Fuente: <http://www.seflucepo.com>

5.1.4 Procedimiento a seguir en campo

El procedimiento a seguir en campo a la hora de implementar una nueva tecnología para el tratamiento de cortes de perforación como lo es la tecnología Endrill de encapsulamiento y re-uso de los cortes de perforación, debe estar regido por una serie de pasos a seguir como se ilustra en la figura 24, que nos brinden la posibilidad de comprender los procedimientos a seguir para poder implementar en campo esta tecnología y a través de ellos obtener una mayor eficiencia del método.

- Se recolectan los ripios a la salida de los equipos de control de sólidos (zaranda o centrifuga) en un tanque de tres caras. La carga de alimentación del proceso es llevada mediante el empleo de un cargador frontal, desde el tanque de tres caras al tanque mezclador, en una cantidad constante de ripios o batch, establecida de antemano con base a la capacidad del equipo de mezclado y en función de las cantidades de aditivos que deben ser agregados.
- Una vez lleno el tanque mezclador, se procede a agregar agua y los aditivos con agitación constante para garantizar un mezclado homogéneo de los componentes de acuerdo a la formulación preestablecida.
- Una vez completado el mezclado de materiales (ripio + aditivos), son descargados por gravedad en un tanque receptor a la salida del equipo de mezclado. Posteriormente los ripios encapsulados (agregados) son trasladados mediante una retro-excavadora hasta el área designada para el curado (deshidratación y endurecimiento) de los agregados y extendidos en el suelo para formar capas de aproximadamente 20 cms, de forma de promover y acelerar el fraguado de las mezclas en un periodo de aproximadamente 8 horas.
- Finalmente son recolectadas las muestras de ripios sin y con tratamiento para su caracterización.

5.1.5 Ventajas

- Se pueden tratar cortes contaminados con lodo base aceite mineral
- En comparación con Landfarming se reducen costos de hasta un 50%
- Aplicable en operaciones offshore ya que el espacio requerido para su tratamiento es reducido.
- Generalmente no se hace necesario implementar un tratamiento adicional ya que este garantiza la calidad del material encapsulado con relación al cumplimiento de la normatividad ambiental.

5.2 EXPERIENCIA EN CAMPO

La tecnología Endrill fue aplicada en el Distrito Sur de PDVSA, pionera en la implementación de tecnologías ambientales novedosas, desde agosto del año 2001, completándose en el 2004 el tratamiento de 30 pozos que han generado unos 9.000 m³ de ripios encapsulados. Entre las razones por las cuales se implementó la tecnología de encapsulación tenemos:

- la imposibilidad de aplicación de los procesos tradicionales de “landfarming” ya que las locaciones petroleras se encuentran cercanas a cuerpos de agua y los niveles freáticos por lo general son altos.
- El procedimiento de encapsulación requiere de un mínimo de área, no perturba las operaciones de perforación y se realiza en línea
- Los costos del proceso de encapsulación son de órdenes menores a los del tratamiento tradicional y el material resultante posee propiedades geotécnicas que permiten su re-uso como sub-base en locaciones petroleras.

En el presente estudio se presentan los resultados obtenidos en tres años de aplicación de la tecnología Endrill, así como los resultados preliminares del uso de encapsulados como llenante de mezclas asfálticas.

5.2.1 Resultados

Al implementar a escala de campo esta tecnología se realiza como punto de partida una comparación entre los componentes presentes en los cortes de perforación antes de ser tratados y porque surge la necesidad de hacerlo. La tabla 5, muestra los resultados obtenidos en la caracterización de los ripios de perforación, se observa que con relación a la normativa ambiental, los ripios no pueden ser dispuestos al medio ambiente sin tratamiento previo ya que incumplen los máximos de concentración de Aceites y Grasas, establecidos de 1 a 3% y en

ocasiones los de pH señalados de 6 a 9 unidades. Con relación a los restantes parámetros establecidos en la norma para controlar la calidad ambiental de los ripios, se encuentran por debajo de los máximos.

Tabla 5. Características principales de ripios sin tratar

PARÁMETROS	RANGO	NORMATIVA	
		Confinamiento	Esparcimiento
PH (Unidad de PH)	7,1 - 9,5	6 - 9	5,8
Aceites y Grasas	4,9 - 11,7	<3	<1
Relación absorción de Sodio	1,9 - 8,9	<12	<8
Ensayos de Lixiviación			
Metales	0,001 - 1,90		0,2-100
Aceites y grasas	2,0 - 3,4		ND

Fuente: <http://www.seflucentpo.com>

En cuanto a las características mecánicas de los ripios de perforación, parámetros de extrema importancia para especificar su uso apropiado como materiales de relleno, se debe señalar en primera instancia que el proceso de encapsulamiento ocasiona una transformación química en los ripios. Esto es puesto en evidencia por los cambios de granulometría, ya que los ripios en su estado inicial no poseen características mecánicas para su compactación, condición alcanzada después del tratamiento.

Las características mecánicas y físicas obtenidas se presentan en la tabla 6. Se observa que los resultados determinados en el estudio se encuentran por debajo de los máximos propuestos por la normatividad ambiental. Los valores de resistencia a la comprensión confinada obtenidos fueron de 70 a 169 psi, muy

superiores a los propuestos en las especificaciones técnicas de 10 psi. Este parámetro es un excelente indicativo de la coherencia estructural impartida por la formulación empleada.

Con relación a la evaluación del material encapsulado para aplicación como material de relleno en locaciones petroleras se determinaron los parámetros tipos indicativos como son: Proctor Modificado (relación densidad máxima seca a la humedad óptima) y CBR (capacidad de soporte). Los valores promedios obtenidos de Proctor fueron de 1,28 a 1,51 toneladas por m³ para valores de humedad óptimas de 19 a 28%. Estos valores indican la factibilidad de uso del material encapsulado como material de relleno. En cuanto a la Relación de Soporte Californiano (CBR) se obtuvieron valores de 17 a 25% que, de acuerdo a la referencia consultada (ASTM D 1883-83), están en las especificaciones para uso del material como sub-base.

Tabla 6. Características principales ripios encapsulados

PARÁMETROS	RANGO	LINEAMIENTO TECNICO
PH (unidades de pH)	8,3-11,8	6,0 - 12,5
Aceite y Grasas	1-3	ND
Ensayos de Lixiviación	0,001-0,50	0,2 - 100
Metales	0,9-1,4	<30
Resistencia compresión confinada	70-169	>10
Relación soporte californiano	17-25	ND

Fuente: <http://www.sefluemppo.com>

Las figuras 25 y 26 ilustran el uso de los encapsulados en una locación petrolera, como en cualquier construcción civil de tierra; los ripios encapsulados fueron triturados hasta tamaños de aproximadamente ½ pulgada, conformados en pilas y esparcidos sobre la base del terreno en capas de aproximadamente 15 cm. Las

capas son rociadas con agua hasta alcanzar el valor máximo de humedad óptimo, luego se procede a su compactación, para colocar nuevas pilas de encapsulado y proceder a repetir el ciclo, rociado de agua y compactación. Entre los lapsos de tiempo de colocación de las capas de material encapsulado, se efectuaron las mediciones de densidad y humedad de forma de garantizar que se alcancen los valores mínimos de control de calidad como son un 95% del Proctor modificado y humedad óptima de aproximadamente 2,5%.

Figura 25. Colocación de encapsulado



Fuente: <http://www.sefluempo.com>

Figura 26. Aspecto final de locación



Fuente: <http://www.sefluempo.com>

Finalmente para concluir la obra, se procedió a colocar sobre las capas de encapsulado la capa superior de rodamiento. El área de prueba fue sometida a tránsito pesado durante la mudanza del taladro, sin sufrir ningún comportamiento anómalo a la fecha (hundimiento, fracturas), lo cual indica la viabilidad en el uso de los encapsulados como material de relleno.

Durante la aplicación de la tecnología Endrill en el Distrito Sur se han procesado aproximadamente 9.000 m³ de ripios, procedente de 30 pozos, empleándose el 70% del material encapsulado en ampliación de locaciones petroleras y el restante 30% como relleno. También se han generado ahorros de un 50% de costos en relación con el manejo tradicional de los ripios.

Respecto al seguimiento ambiental, este fue realizado por dos vías diferentes. En un primer caso, se colocaron pozos de muestreo de agua en la adyacencia de la locación, donde se realizó la colocación del material encapsulado como sub-base, con la finalidad de detectar alguna posible lixiviación de sustancias al ambiente. Los resultados obtenidos a los tres meses son mostrados en la tabla 7, las determinaciones incluyeron, aceites y grasas, así como metales aguas arriba y debajo de la locación. Los resultados no indican valores anómalos en ninguno de los parámetros medidos.

Tabla 7. Características de aguas de pozos, empleados en el seguimiento de lixiviados

Propiedades (mg/l)	Muestra aguas arriba	Muestra aguas abajo
Aceites y Grasas	1,6 - 4,3	1,6 - 3,8
pH	4,83 - 5,64	5,54 - 5,87
As	<0,0001	<0,0001
Ag	0,05	0,05
Ba	0,06 - 0,52	0,08 - 0,19
Cd	<0,02	<0,002
Cr	<0,05	<0,05
Ni	0,05	0,05
Pb	<0,05	<0,05
Se	<0,001	<0,001
Zn	0,02 - 0,17	0,04 - 0,08

Fuente: <http://www.sefluempo.com>

En cuanto a los efectos de los lixiviados de encapsulados sobre las plantas, los resultados indican que las plantas regadas con agua de lavado de los encapsulados crecieron en forma similar a las plantas controles regados con agua normal. Se destaca que la producción de biomasa aérea de las plantas regadas con agua de los encapsulados, no se inhibe y por el contrario tiende a aumentar su crecimiento. Esto se atribuye a la presencia de nutrientes (Ca, Mg, Na y K)

existentes en mayor cantidad en las aguas de lixiviación, respecto al agua de chorro.

6. COMPARACIÓN TÉCNICA DEL MÉTODO ENDRILL CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE CORTES DE PERFORACIÓN

A lo largo de los capítulos 3, 4 y 5 se ha realizado una descripción detallada de algunas de las técnicas convencionales y no convencionales para el tratamiento y disposición de los cortes provenientes de las actividades de perforación disponibles en la actualidad, enumerando sus principales características técnicas, ventajas y desventajas para finalmente al llegar a este capítulo realizar una comparación técnica en la que se demuestre cuál de estas tecnologías es la más factible tanto económica como ambientalmente.

La parte ambiental incluye los parámetros que pueden afectar el medio ambiente al realizar cada técnica como son: contenido de aceite presente en los cortes después de ser tratados, disposición final y la cantidad de agua involucrada en el proceso que después deberá ser tratada. En cuanto al aspecto económico se enumeran muchos más factores como: consumo de energía, costos de tratamiento, material recuperado, entre otros.

Dado que el punto de comparación se llevará a cabo entre Endrill y los métodos convencionales y no convencionales de tratamiento de cortes de perforación, se debe tener en cuenta que los métodos seleccionados son aquellos disponibles para el tratamiento de cortes de perforación para lodo base aceite. Esto por supuesto nos lleva a una reducida lista comparativa, ya que en su mayoría las tecnologías disponibles son para lodos base agua.

Lo primero que se debe hacer es seleccionar entre los métodos convencionales y no convencionales para tratamientos de cortes de perforación cuál de estos métodos será útil para la comparación técnica.

Tabla 8. Selección de métodos convencionales y no convencionales para realizar la comparación técnica

TECNICA	CORTES BASE AGUA	CORTES BASE ACEITE
CONFINAMIENTO EN PISCINAS Y CELDAS	SI	NO
DESORCIÓN TÉRMICA	NO	SI
INCINERACIÓN	SI	SI
SOLIDIFICACIÓN Y ESTABILIZACIÓN	SI	SI
ESTABILIZACIÓN CON CAL VIVA	SI	NO
REINYECCIÓN	SI	SI
POR MICROONDAS	SI	SI
VERMICOMPOSTAGE	SI	NO
CO ₂ SUPERCRITICO	NO	SI

Fuente: autores

En la tabla 8 se observan aquellos métodos que pueden ser utilizados para el tratamiento de cortes de perforación base aceite pero se hace preciso excluir la solidificación/estabilización, ya que no cumple a cabalidad con los requisitos para pasar a la siguiente etapa, puesto que aunque puede ser empleada para cortes base aceite solamente puede procesar cortes con bajas concentraciones de hidrocarburos.

En la tabla 9 se realizara la respectiva comparación técnica.

Tabla 9.Comparación técnica

TECNICA	COSTOS DE TRATAMIENTO	RE-USO	ESPACIO REQUERIDO	CONSUMO DE ENERGÍA	CONTENIDO DE PETROLEO FINAL EN EL CORTE	AGUA INVOLUCRADA EN EL PROCESO
Desorción térmica	Alto	Re-uso aceite y cortes	Considerable	Alto	>1%	No requiere
Incineración controlada	Alto	Nada	Considerable	Alto	<1%	No requiere, si genera
Reinyección	Bajo	Nada	Mínimo	Bajo	-----	Si requiere, no genera
Microondas	Bajo	Re-uso aceite	Mínimo	Medio	<0,1%	No requiere, si genera
CO₂ supercrítico	Alto	Re-uso aceite	Considerable	Bajo	0,2%	No requiere
Endrill	Bajo	Re-uso de cortes	Mínimo	Bajo	<1%	Si requiere, no genera

Fuente: autores

6.1 ANALISIS DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL

Como las preocupaciones ambientales juegan un papel creciente en la industria petrolera, la eliminación o disposición de residuos de perforación se ha convertido en un componente inevitable e importante hoy en día, al cual se le debe dar igual o mayor importancia que al aspecto económico.

6.1.1 Contenido residual de aceite

En un análisis preliminar a la tabla 9 se observa que para el caso de la desorción térmica es el único tratamiento que no logra llevar el contenido de aceite residual en los cortes a un valor inferior al 1% por lo que habría que implementar otro método (si se quisiese verter en cuerpos de agua) para llevarlo a los niveles establecidos en la normatividad ambiental, lo cual me generaría costos adicionales. Sin mencionar que la desorción térmica por si sola es uno de los procesos de tratamientos de cortes más costosos.

En oposición a la desorción encontramos los tratamientos con microondas y la extracción con CO₂ supercrítico los cuales logran reducir el contenido de aceite en el corte hasta valores de 0,1%.

6.1.2 Agua involucrada en el proceso

Se tiene en cuenta este parámetro puesto que como se ha mencionado a lo largo de varios capítulos el tratamiento y disposición de cortes y aguas asociados a las actividades de perforación generan un gran problema ambiental lo cual se ve reflejado en un aumento en los costos de tratamiento.

En el caso de la incineración controlada el proceso como tal no requiere el uso de agua, pero si genera aguas condensadas las cuales deben ser tratadas antes de

ser vertidas en cualquier cuerpo de agua. Este factor se ve reflejado en costos de tratamiento y se debe tener en cuenta que la incineración controlada al igual que la desorción son tratamientos sumamente costosos.

Un caso particular son la tecnología Endrill y el método de reinyección puesto que para llevar a cabo su tratamiento requieren el uso de agua, pero al finalizar el tratamiento no se generan aguas residuales, por lo que no se hace necesario ningún tratamiento adicional. Un punto que suma en contra (-) para el tratamiento con microondas, es que durante este método al igual que en la incineración se producen aguas condensadas, las cuales requieren tratamiento previo a su disposición y vertimiento.

En la tabla 10 se valoran los puntos a favor (+) y en contra (-) en cada técnica para pasar al siguiente nivel.

Tabla 10. Puntos a favor y en contra para cada técnica

TECNICA	CONTENIDO DE PETROLEO FINAL EN EL CORTE	AGUA INVOLUCRADA EN EL PROCESO
Desorción térmica	-	
Incineración controlada		-
Reinyección		+
Microondas	+	-
CO ₂ supercrítico	+	
Endrill		+

Fuente: autores

Al llegar a este punto y teniendo en cuenta los parámetros ambientales como factor principal en la toma de decisiones de cualquier actividad de exploración y

producción, se tendrían como prospectos para un desarrollo petrolero los métodos de extracción con CO₂supercrítico, Endrill y reinyección como posibles tecnologías a seleccionar.

6.2 ANÁLISIS DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO

Como se ha venido mencionando el factor económico es decisivo a la hora de establecer si un proyecto se desarrolla o no. Teniendo en cuenta que el proyecto debe ser factible económicamente, es decir, lucrativo.

6.2.1 Espacio requerido

Hace referencia al espacio necesario para llevar a cabo el tratamiento de cortes. Para el caso de la extracción con CO₂supercrítico se requiere un espacio considerable puesto que para llevar a cabo el tratamiento utiliza cilindros de alta presión que ocupan un gran volumen en locación y si se tiene en cuenta además que el tratamiento de cortes se pretende realizar off-shore esto refleja puntos en contra para esta técnica. En el caso de la reinyección y Endrill, éstas requieren un mínimo de espacio y son ampliamente recomendadas para actividades costa afuera.

6.2.2 Re-uso

Este parámetro hace referencia a la posibilidad de reducir costos de tratamiento al poder recuperar durante cada tratamiento materia prima y darle un uso adecuado.

Para el caso de la extracción con CO₂supercrítico se puede reciclar el aceite y posteriormente emplearlo en el sistema de lodos ya que a diferencia de la desorción térmica en este caso no hay alteración en la composición del aceite

recuperado, puesto que el CO₂ supercrítico actúa como un solvente de compuestos no polares como los hidrocarburos. Por lo tanto el aceite recuperado puede ser completamente reutilizado sin ningún tratamiento adicional.

En el caso de la tecnología Endrill los cortes obtenidos al finalizar el tratamiento cuentan con las propiedades físico-químicas y mecánicas necesarias para ser empleados en la industria de la construcción, logrando reducir costos de tratamiento casi en un 50%. Todo lo contrario ocurre con la reinyección en la cual los cortes son devueltos al pozo e inyectados en fracturas imposibilitando cualquier obtención de materia prima.

6.2.3 Costos de tratamiento

Durante la toma de decisiones de cualquier actividad de la industria lo que se quiere lograr es obtener la mayor ganancia posible con los menores costos de inversión. Es un factor determinante a la hora de decidir si se realiza o no un proyecto.

Para el caso de la extracción con CO₂ supercrítico se tiene el costo de tratamiento más elevado no solo porque es una tecnología que hasta ahora se está desarrollando e investigando para ser aplicada sino porque requiere para su tratamiento cilindros de limpieza de alta presión y las válvulas requeridas para el sistema, lo cual incrementa considerablemente los costos y la hace menos factible económicamente con respecto a las técnicas Endrill y CRI.

Las tecnologías de reinyección y Endrill requieren un bajo costo de tratamiento, pero a diferencia de Endrill la reinyección tiene altos costos operacionales sin mencionar que se deben tener en cuenta muchos parámetros (simulaciones numéricas, selección de zonas, etc.) para poder aplicar correctamente esta técnica.

Tabla 11. Comparación técnica entre Endrill y métodos no convencionales de tratamiento de cortes de perforación

TECNICA	COSTOS DE TRATAMIENTO	RE-USO	ESPACIO REQUERIDO
Reinyección	+	-	+
CO ₂ supercrítico	-	+	-
Endrill	+	+	+

Fuente: autores

Antes de finalizar es importante tener en cuenta que para realizar la comparación técnica se hizo la suposición que para cada una de las técnicas se realizaría el tratamiento de cortes de perforación de varios pozos.

Al llegar a este punto queda claramente demostrado que con algunos puntos en contra y varios a favor la tecnología Endrill se considera la más factible tanto económica como ambientalmente para implementar tanto en locaciones on-shore como off-shore.

CONCLUSIONES

Para elegir un adecuado tratamiento de cortes de perforación se deben tener en cuenta no solo factores económicos sino algunos factores operacionales como son: el tipo de lodo contaminando el corte, volumen de corte a tratar, área disponible para el tratamiento de los mismos y si el tratamiento a realizar se va a llevar a cabo in-situ o ex-situ, ya que muchos de los tratamientos de cortes existentes presentan limitaciones.

La alternativa entre todas las opciones para tratamiento de cortes de perforación depende de los parámetros a regularse según sea el caso y según lo estipule el reglamento ambiental vigente en cada país.

La implementación de centros de acopio es una buena alternativa para el tratamiento de cortes de perforación (Ex-situ) ya que estos permiten ahorrar espacio en el taladro por lo que ese espacio podría ser utilizado para otros propósitos en las actividades de perforación.

Se ha demostrado mediante la implementación de la tecnología Endrill en campo que a la hora de tratar cortes de perforación en operaciones offshore, esta técnica es la mejor opción ya que el procedimiento de encapsulación requiere un mínimo de área, no perturba las operaciones de perforación y se realiza en línea y en tiempo real.

Aunque Endrill es una tecnología relativamente nueva y poco estudiada se ha demostrado que si los cortes de perforación a tratar cumplen con las especificaciones para poder aplicar el método éste es el más indicado porque no

genera impactos ambientales negativos ya que reduce los contaminantes del corte en una matriz solida evitando que estos migren al medio ambiente.

La tecnología Endrill permite reducir los costos de tratamientos de cortes de perforación en un 50% en comparación con los tratamientos convencionales, gracias a que el material encapsulado puede ser utilizado como relleno de mezcla asfáltica o en la ampliación de locaciones petroleras.

La caracterización físico-química y mecánica del material encapsulado permite garantizar la calidad de éste con relación al cumplimiento de la normativa ambiental vigente y las especificaciones de uso para su empleo en construcciones civiles de tierra.

Las tecnologías que se han desarrollado durante los últimos años para el tratamiento y disposición de cortes son solo una mejora de los tratamientos convencionales.

La extracción con CO₂ supercrítico es una técnica que claramente podría llegar a competir con tecnologías como la reinyección y Endrill si se dispusiese un mayor capital de inversión para ser estudiada.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de factibilidad para la implementación del método Endrill en campos de Colombia.
- Realizar una evaluación económica que permita determinar qué tan factible sería implementar la tecnología Endrill en los pozos de Chuchupa-Ballena.
- Realizar una comparación técnica entre Endrill y el método de re-inyección para el tratamiento y disposición de cortes de perforación en operaciones costa afuera para determinar cuál de ellos es el más factible tanto económica como ambientalmente.
- Realizar investigaciones que impulsen al desarrollo de nuevas tecnologías y a la mejora de las ya existentes.
- Implementar un estudio que permita observar que tan factible sería utilizar el encapsulado no solo en locaciones petroleras sino extender su uso para obras civiles.

BIBLIOGRAFIA

Ballesteros, Cristina., "Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el campo tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum". Tesis De Grado. Universidad de Oriente. 2007

Booth, M.J., "Drilling cuttings on the sea bed: the options". SPE 35918

Chang, Chang, Luis., "CBR (California Bearing Ratio)". Centro Peruano Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres.

Drilling Fluids processing Handbook

Drilling Fluids Technical Manual, Dowell, Schlumberger, 1994.

Environmental Protection Agency (EPA): "Test Methods for Evaluating Solid Waste: Laboratory Manual Physical/Chemical Methods". 1992

García Rivero, Mayola., "Transferencia de masa y biodegradacion de hidrocarburos de un suelo intemperizado en un cultivo de suelo en suspensión".2003

Geehan, T., Gilmour, A., Guo, Q., "The cutting edge in drilling waste management" Schlumberger. 2006

Hagan, J., R, Laurence., "Engineering and Operational Issues Associated with Commingled Drill Cuttings and Produced Water Re-injection Schemes". SPE 73918

<http://www.cenapred.gob.mx/>

<http://www.edafologia.ugr.es/>

J. Robinson., S, Kingman., “Microwave Treatment of Oil Contaminated Drill Cuttings- Towards a Commercial Scale System”. SPE 127064

Jones, L:W., “Interference Mechanisms in Waste Stabilization/Solidification Process”. Journalof Hazardous. 1990

Leal, Christian., Lizarazo, Julian., “Estudio para la implementación de reinyección de cortes durante la perforación de pozos”. Tesis De Grado.Universidad Industrial de Santander. 2011

LIENDO, Fernando., “Re-uso de ripios encapsulados en obras civiles asociadas con perforación” PDVSA INTEVEP.

Maroto Arroyo, M^a Esther., Rogel Quesada, Juan Manuel., “Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos”.

Martinez, Jaime., Ruiz, M. Antonio., “ENVIROCENTER, un nuevo concepto en el manejo de recortes impregnados de fluidos de emulsión inversa en México”. MI SWACO.

Norma Técnica Colombiana. Gestion Ambiental. “Tratamiento de los cortes producidos durante la perforación de pozos de petróleo con lodo base aceite. Fijación con cal viva”. NTC 4343

Paulsen, John E., Getliff, Jonathan., “Vermicomposting and Best Available Technique for Oily Drilling Waste Management in Environmentally Sensitive Areas” SPE 86730

Rylance, M., "Fracture Mechanics Relating to Cuttings Re-injection at Shallow Depth".SPE/IADC 25756.

Suares, Jaime., "Estabilización de suelos". Seminario. Universidad Industrial de Santander.

Veracierta, Luis Emilio., "Evaluación de las técnicas realizadas por el centro de tratamiento y recuperación de desechos en el campo Hamaca, estado Anzoátegui". Tesis De Grado. Universidad de Oriente. 2006

Saintpere, Stephane., Morillon, Anne., "Supercritical CO₂ Extraction Applied to oily Drilling Cuttings". SPE 63126