

**MANEJO Y TRATAMIENTO ACTUAL DE RESIDUOS ACEITOSOS EN LA
INDUSTRIA PETROLERA COLOMBIANA**

**IVAN FERNANDO CASTELBLANCO CASALLAS
JHON ANDERSON NIÑO AVENDAÑO.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2011

**MANEJO Y TRATAMIENTO ACTUAL DE RESIDUOS ACEITOSOS EN LA
INDUSTRIA PETROLERA COLOMBIANA**

**IVAN FERNANDO CASTELBLANCO CASALLAS
JHON ANDERSON NIÑO AVENDAÑO.**

**Proyecto de grado presentado como Requisito para optar el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director (a)
OLGA PATRICIA ORTIZ CANCINO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

Presento la dedicatoria de este trabajo a DIOS, por darme la fuerza espiritual, a mi madre y mi padre que junto a mis hermanos han sido la constante inspiración de mi vida quienes con su ejemplo, dedicación y esfuerzo han consagrado en mí , la fortaleza para materializar mis metas. A aquellas grandes personas que han estado conmigo en los momentos más significativos, de este proceso, de las que he aprendido en gran medida y hoy denomino mis amigos. No olvido tampoco a mis abuelitas Felipa Niño (Q.E.P.D) y Rosa Delia Prada de Avendaño (Q.E.P.D) que desde lo más alto del mundo espiritual han de guiarme por los caminos de la sabiduría y la verdad. Gracias, eternas e infinitas gracias.

Jhon Anderson Niño Avendaño

DEDICATORIA

A ti mamá por ser el vivo ejemplo de la lucha, la fuerza y el empuje que muchas veces necesite. Gracias.

Tu padre mío, que eres mi orgullo, mi amigo, y a quien siempre quise enorgullecer, esto también es para ti.

A ti hijo hermoso por ser mi razón primera en momentos donde mi voluntad se quebrantaba, eras tú quien me alentaba a seguir.

Magda y Lina, mis hermosas hermanas, las mujeres que más amo y que siempre me apoyaron.

Al inconfundible e inolvidable hermano de mi alma Arcadio Cuy que siempre fue una verdadera compañía e incondicional apoyo.

Como olvidarme de la Familia Bernal Castelblanco, que siempre estuvo dispuesta a colaborarme cuando más lo necesite. Este gran logro también es de ustedes

A mis grandes amigos y compañeros que siempre fueron testigos de este gran esfuerzo

Y a ti en especial Mi Niña Bonita, que me acompañaste en los momentos más difíciles, cuando más crudas eran las circunstancias, siempre estuviste ahí, siempre serás mi bandera al viento.....

Iván Fernando Castelblanco Casallas

AGRADECIMIENTOS

A la **ING. OLGA PATRICIA ORTIZ CANCINO** por su amable colaboración en la realización de este proyecto.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

Al **ING. HARVING DIAZ CONSUEGRA** que con su apoyo y orientación se logro estructurar este proyecto, y así culminar con éxito este trabajo.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

A los ingenieros **ING NEDER RODRIGUEZ**, líder temático e **ING. VANESSA CARDONA**, gestora técnica, quienes en su papel de realizadores del esquema de tratamiento **AMIR**, nos recibieron en las instalaciones del proyecto La Cira Infantas y dieron la asesoría necesaria para darle el aporte técnico que el proyecto requería.

**EL CENTRO, ECOPETROL-OCCIDENTAL ANDINA LLC.
BARRANCABERMEJA**

Al **ING. CARLOS ALBERTO RESTREPO ARAMBURO** subgerente coordinador del área ambiental de **PETROLABIN Ltda.** que de una manera cordial y atenta, basado en su experiencia laboral y académica supo brindarnos los consejos e información necesarios para la realización de este proyecto.

PETROLABIN Ltda.

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** institución que nos ofreció excelente formación académica.

A nuestras familias por su incondicional apoyo.

A nuestros amigos, los más grandes, los mejores del mundo.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera estuvieron a lo largo de este proceso.

CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS	22
OBJETIVO GENERAL	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
INTRODUCCIÓN	23
1. GENERALIDADES	26
1.1 DEFINICIÓN DE RESIDUO / DESECHO	26
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS	29
1.2.2 Clasificación por origen.	29
1.2.3 Clasificación por tipo de tratamiento al que serán sometidos	30
1.2.4 Clasificación por los potenciales efectos derivados del manejo	31
1.3 RESIDUOS PELIGROSOS	31
1.3.1 Inflamabilidad	32
1.3.2 Corrosividad.	33
1.3.3 Reactividad	33
1.3.4 Explosividad	34
1.3.5 Toxicidad	35
1.3.6 Clasificación general de los residuos peligrosos ¹	36
1.3.7 Residuos peligrosos conforme la resolución 2309 de 1986 de Colombia	38
2. LEYES Y NORMÁS QUE SE APLICAN EN COLOMBIA.	41
2.1 NORMÁS AMBIENTALES DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA	41
2.2 LEYES Y DECRETOS PARA EL MEDIO AMBIENTE	42
2.2.1 Ley 99 de 1993	42
2.2.2 Ley 99 de 1993 y decreto 2820 del 5 de agosto de 2010	45
2.2.3 Decreto- Ley 2811 de 1974	47
2.4 NORMATIVIDAD EXTRANJERA COMO MODELO DE APLICACIÓN EN LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA.	50

3. RESIDUOS GENERADOS POR LAS OPERACIONES DE EXPLORACION Y PRODUCCION.	53
3.1 AGUA PRODUCIDA	53
3.2 RESIDUOS DE OPERACIONES DE POZO	53
3.3 OTROS RESIDUOS ASOCIADOS	54
3.4 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS	54
3.4.1 Agua producida	54
3.4.2 Residuos de perforación, completamiento y reacondicionamiento de pozos.	55
3.4.3 Residuos provenientes de operaciones de perforación.	55
3.4.3.1 Cortes de perforación	55
3.4.3.2 Fluidos de perforación	56
3.4.3.3 Fluidos de completamiento y reacondicionamiento de pozos.	57
3.4.3.4 Fluidos de tratamiento de pozo	57
3.5 COMPOSICIÓN DE FLUIDOS EN PERFORACIÓN, COMPLETAMIENTO, REACONDICIONAMIENTO DE POZOS Y OPERACIONES DE ESTIMULACIÓN	57
3.6 OTROS RESIDUOS ASOCIADOS	59
3.7 OPCIONES DE MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA PERFORACIÓN, COMPLETAMIENTO Y REACONDICIONAMIENTO DE POZOS	60
3.8 PLANEAMIENTO DE MANEJO DE RESIDUOS ACEITOSOS	60
3.9 BENEFICIOS ECONÓMICOS	70
4. TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE RESIDUOS	71
4.1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN SITU	71
4.1.1 Bioventeo	71
4.1.2 Biorremediación	75
4.1.3 Biorremediación mejorada	76
4.1.4 Fitorremediación	81
4.2 TRATAMIENTO BIOLÓGICO EX – SITU	85
4.2.1 Biopilas	85

4.2.3 Compostaje	89
4.3.3 Landfarming	92
4.4 TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO IN SITU	94
4.4.1 Oxidación química.	94
4.4.2 Tratamiento electrocinético	97
4.4.3 Lavado de suelos	100
4.4.4 Extracción de vapor	102
4.4.5 Solidificación/Estabilización	105
4.5 TRATAMIENTO TÉRMICO (IN SITU-EX SITU)	107
4.5.1 Tratamiento térmico In situ	107
4.5.1.1 Incineración	107
4.5.2 Tratamiento térmico ex situ	110
5. MINIMIZACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS DURANTE DERRAMES DE PETRÓLEO	113
5.1 ASPECTOS GENERALES	113
5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS ASOCIADAS A RIESGO	115
5.3 CAUSAS QUE CONLLEVAN A DERRAMES DE CRUDO	116
5.4 COMPORTAMIENTO DEL CRUDO EN TIERRA	118
5.4.1 Evaporación	119
5.4.2 Infiltración	119
5.4.3 Biodegradación	120
5.4.4 Adherencia superficial	120
5.4.5 Distribución horizontal	120
5.5 ALGUNAS CONSIDERACIONES EN EL MANEJO DE RESIDUOS PROVENIENTES DE DERRAMES	120
5.5.1 "Status" de los residuos.	120
5.5.2 Segregación	121
5.5.3 Minimización	121
5.5.4 Contaminación secundaria	122

5.6 DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS Y SUS EFECTOS	123
5.6.1 Técnicas de limpieza	123
5.6.1.1 Aplicación de dispersantes.	123
5.6.1.2 Limpieza de derrames On-Shore.	124
5.7 BREVE CASO	125
5.7.1 Estudio de caso Prestigie, España 2002	125
5.8 EQUIPOS DE RESPUESTA Y CONTROL A DERRAMES DE CRUDO	126
5.8.1 Principales equipos de respuesta a derrames de crudo	126
5.8.1.1 Mecánicos	126
5.8.1.1.1 Barreras de contención	127
5.8.1.1.2 Equipos o elementos recolectores (Skimmers)	129
5.8.1.1.3 Bombas	131
5.8.1.2 Químicos	134
5.8.1.2.1 Uso de dispersantes	134
5.9 PAUTAS PARA EL CONTROL DE DERRAMES EN TIERRA	137
6. SITUACIÓN GENERAL DEL PROYECTO	140
6.1 OBJETIVO DEL PROYECTO AMIR	141
6.2 ALCANCE	141
6.3 DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA.	141
6.3.1 Zona A	142
6.3.2 Zona B.	143
6.3.2.1 Para recuperación de lodos base agua (zona B)	143
6.3.2.2 Para tratamiento de lodo desecho y agua residual asociada con al lodo base agua de perforación. Una unidad de dewatering con:	144
6.3.2.3 Para tratamiento de los cortes.	144
6.3.2.4 Infraestructura	145
6.3.3 Zona C.	146
6.3.3.1 Unidad de Tratamiento de Aguas aceitosas y de fluidos de servicio a pozos (UTA)	146

6.3.3.2 Unidad de Tratamiento de Lodos o emulsiones (UTL)	147
6.3.3.3 Infraestructura	147
6.3.4 Zona D	148
6.3.4.1 Infraestructura	149
6.4. DESCRIPCIÓN DE PROCESOS.	149
6.4.1 Lodos base agua	150
6.4.2 Tratamiento de agua asociada con los lodos de perforación	151
6.4.3 Proceso de Centrifugado y Secado de Cortes de Perforación (VORTEX).	151
6.4.4 Tratamiento de Residuos Aceitosos de la Operación	152
6.5 CLASIFICACIÓN POR GRUPOS DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS	153
6.5.1 Grupo 1	153
6.5.1.1 Fluidos Acuoso Contaminados	153
6.5.1.2 Fluidos Acuoso con alto contenido de cloruros Contaminados con crudo provenientes de las actividades de Reacondicionamiento de pozos (workover)	154
6.5.2 Grupo 2	156
6.5.2.1 Fluidos Aceitosos, Emulsiones, Mogo- Mogo y lodos	156
6.5.3 Grupo 3	157
6.5.3.1 Sólidos Aceitosos y Borrás	157
6.5.4 Grupo 4	158
6.5.4.1 Residuos sólidos con menor contenido de hidrocarburo	158
6.6 TRATAMIENTOS	159
6.6.1 Tratamiento Residuos Líquidos Aceitosos (fluidos de servicio a pozos y aguas aceitosas), Zona C, UTA	159
6.6.2 Tratamiento Residuos Acuoso Contaminados con Hidrocarburo (lodos y emulsiones aceitosas), Zona C, UTL	159
6.6.3 Tratamiento de los residuos líquidos y sólidos acuoso con alto contenido de hidrocarburo (salmueras de reacondicionamiento de pozos, aguas aceitosas y de facilidades de la operación), Zona C.	159

6.6.3.1 Salmueras de reacondicionamiento de pozos y Aguas Aceitosas	160
6.6.3.2 Sólidos Acuoso Con Alto Contenido de Hidrocarburos o Residuos de Facilidades de la Operación.	161
6.6.4 Tratamiento de Residuos por Biorremediación o Landfarming, Zona D.	161
6.6.4.1 Tipos de Residuos a tratar:	161
6.7 EQUIPO MÍNIMO REQUERIDO	166
6.8 ANÁLISIS ECONÓMICO	167
6.9 DOCUMENTACIÓN EN CAMPO SURIA (META)	168
CONCLUSIONES	171
RECOMENDACIONES	173
BIBLIOGRAFIA	174

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Esquema de la jerarquización del manejo de residuos aceitosos.	62
Figura 2 Diagrama de flujo de la planeación y tratamiento de los residuos aceitoso	63
Figura 3 Esquema de un sistema típico de bioventeo.	71
Figura 4 Esquema general del proceso de biorremediación mejorada.	77
Figura 5 Asimilación y degradación de contaminantes por las raíces de la planta	82
Figura 6 Esquema típico del sistema de biopilas	85
Figura 7 Esquema de tratamiento de suelos por landfarming	92
Figura 8 Sistema típico del proceso de oxidación química.	95
Figura 9 Sistema de tratamiento electrocinético	99
Figura 10 Proceso típico del lavado de suelos.	101
Figura 11 Esquema de extracción por vapor.	103
Figura 12 Esquema de una vitrificación in situ.	107
Figura 13 Tratamiento de suelos por incineración.	108
Figura 14 Esquema general del tratamiento de suelos por desorción térmica.	111
Figura 15 Relación entre hidrocarburo derramado y residuos generados	114
Figura 16 diagrama de flujo y balance de masa, del proceso de tratamiento de residuos asociados con el lodo base agua de perforación, en el área de manejo integral AMIR.	164
Figura 17 Diagrama de flujo del tratamiento de residuos sólidos y líquidos aceitosos de reacondicionamiento de pozos y de la operación en el Área de Manejo de Residuos	165

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1 Recortes de perforacion.	55
Imagen 2 Lodos de perforación retornando a superficie	56
Imagen 3 y 4 efectos del crudo en tierra	118
Imagen 5 contaminación secundaria	123
Imagen 6, 7 y 8 barreras de contención	127
Imagen 9, 10, 11 y 12 diferentes tipos de skimmers	129
Imagen 13 bomba tipo Lamor	132
Imagen 14 bomba tipo sellwood	132
Imagen 15 bomba tipo sellwood hs range	133
Imagen 16 bomba tipo sellwood chopper	134
Imagen 17 absorbentes biodegradables	136
Imagen 18 aplicación de rompedores de hidrocarburos	137
Imagen 19 vista aérea de las zonas del AMIR	141
Imagen 20 Celda de disposición final de residuos sólidos ordinarios (clausurada)	142
Imagen 21 zona de tratamiento de los residuos asociados a los lodos de perforación base agua (cortes, agua y lodos). Área 11.325 m2	143
Imagen 22 Zona de tratamiento de los residuos líquidos y sólidos acuosos con alto contenido de hidrocarburo (salmueras de reacndicionamiento de pozos, aguas aceitosas y de facilidades de la operación).	146
Imagen 23 zodmes de disposición o landfarming	148
Imagen 24 Vista aérea general del proyecto AMIR	163
Imagen 25 zona de disposición de recortes Rig 338 Suria	168
Imagen 26 zona de disposición de recortes Rig 202 Suria	169
Imagen 27 zona de disposición de recortes Rig 202 Suria	169
Imágenes 26 y 27 Comparación de zonas de disposición	170

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Campos de acción de la Constitución Política Colombiana alusivos al medio ambiente y sus respectivos artículos.	41
Tabla 2 principios ambientales de la ley 99/93 que trascienden a proyectos de la industria del Petróleo.	43
Tabla 3 Clasificación de los residuos aceitosos	58
Tabla 4 Procedimiento para el manejo integral de residuos aceitosos.	61
Tabla 5 Costos estimados por el tratamiento de residuos por Bioventeo. (Costo en dólares)	75
Tabla 6 Costos de remediación aplicando la Fitorremediación.	85
Tabla 7 Costo derivado por el tratamiento de suelos por compostaje (costo en dólares)	91
Tabla 8 costos derivados por el lavado de suelos. (Costo en dólares)	102
Tabla 9 Costos derivados de por la extracción de vapor. (Costo en dólares)	105
Tabla 10 Descripción y clasificación de los residuos de perforación	150
Tabla 11 clasificación final de los residuos aceitosos	153
Tabla 12 Recuperación lodos base agua de perforación	167
Tabla 13 Tratamiento fluidos de servicio a pozos y aguas aceitosas	167
Tabla 14 Tratamiento de emulsiones y lodos	167

RESUMEN

TITULO: MANEJO Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS ACEITOSOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA COLOMBIANA.*

AUTORES: CASTELBLANCO CASALLAS Iván Fernando, NIÑO AVENDAÑO Jhon Anderson.**

PALABRAS CLAVES: aceites, derrames, medio ambiente, disposición final, suelos, contaminantes, residuos, tratamiento, biorremiación, operaciones.

En el mundo las operaciones de exploración y producción de petróleo han contribuido a impactos ambientales negativos, sin embargo Colombia no está exenta a esta problemática y es por eso que se han desarrollado algunos proyectos que buscan establecer ciertas medidas para disminuir el daño al medio ambiente por parte de las diferentes operaciones propias de la industria petrolera. Una de las fuentes de contaminación por parte de la industria son los residuos aceitosos generados específicamente por las operaciones de perforación, completamiento, servicio a pozo y reacondicionamiento de pozos (workover), estos en muchos casos no son tratados y son desechados directamente al medio ambiente, mediante la acción de enterramientos causando graves daños al suelo. Sin embargo algunas empresas comprometidas con las tecnologías verdes se esmeran por diseñar planes estratégicos de contingencia para hacer frente a este tipo de contaminación.

El presente proyecto intenta dar un conocimiento del proceso que se lleva a cabo en el tratamiento de los residuos aceitosos en Colombia, cómo son seleccionados, tratados para aplicarse nuevamente, y cómo los productos finales de estos, es decir los desechos son dispuestos con las mínimas trazas de contaminación para evitar daños ecológicos de alto grado; así mismo, señala la importancia económica que este tratamiento de residuos aceitosos tienen para las empresas, puesto que el ahorro que significa la reutilización de lodos, salmueras, etc. son cantidades de dinero bastante altas.

El trabajo se fundamenta en la investigación realizada por medio de la documentación adquirida y en visitas técnicas a diferentes distritos petroleros que hacen parte de la empresa colombiana de petróleos ECOPEPETROL.

* Trabajo de Grado.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. Olga Patricia Ortiz Cancino

ABSTRACT

TITLE: MANAGEMENT AND CURRENT TREATMENT OF OILY WASTE IN THE COLOMBIAN OIL INDUSTRY.*

AUTHORS: CASTELBLANCO CASALLAS Iván Fernando, NIÑO AVENDAÑO

Jhon Anderson **

KEYWORDS: oils, spills, environmental disposal, soils, contaminants, waste treatment, bioremediation, operations.

Operations worldwide exploration and oil production have contributed to negative environmental impacts, however Colombia is not free at this issue and that is why we have developed some projects that seek to establish some measures to reduce environmental damage from the various operations involved in the oil industry.

One source of pollution by the oily waste industry are specifically generated by the drilling, completion, well servicing and workover, which in many cases are not treated and disposed of directly into the environment, through the action of causing serious damage to burial ground. However, some companies committed to green technologies strive to design strategic contingency plans to deal with this type of pollution.

This project aims to provide an understanding of the process that takes place in the treatment of oily waste in Colombia, as are selected, treated to be reapplied, and as the final products of these, the waste is disposed of with minimal traces of contamination to prevent environmental damage of high grade, show highlights the economic importance of this oily waste have for companies, since the savings that could reuse of sludge, pickles, etc. are important sums of size.

The work is based on research conducted by the acquired documentation and technical visits to different districts tankers that are part of the Colombian Petroleum Company ECOPETROL S.A.

* Project of Degree

** Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physicochemical Engineerings. Petroleum Engineering School. Director Olga Patricia Ortiz Cancino.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar tecnologías y procedimientos actuales para el manejo y tratamiento de los residuos aceitosos durante derrames de crudo y diferentes actividades operacionales de la industria petrolera colombiana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mostrar las diversas formas en que se disponen y tratan desechos adicionales producidos durante las operaciones de perforación y completamiento de pozos, tales como salmueras de reacondicionamiento, lechadas, lodos etc.
- Describir de manera detallada los procedimientos más recientes para el tratamiento de residuos aceitosos enfocados a los sistemas de recuperación de hidrocarburos
- Difundir de manera clara los mejores métodos y procedimientos utilizados actualmente durante derrames de crudo on-shore (productos libres, no contingencias)
- Determinar los efectos de la biorremediación como método para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos
- Dar a conocer casos reales en los cuales fueron empleados las diversas técnicas y metodologías mencionadas en este trabajo para la disposición final de residuos aceitosos y tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos

INTRODUCCIÓN

Los cambios que ha sufrido el planeta a través de la historia con el hombre como principal ente transformador debido a la implementación de las diferentes prácticas desarrolladas para su supervivencia y desarrollo, han contribuido a la afectación del medio ambiente en gran escala a causa de las malas prácticas operacionales impulsadas por un modelo capitalista y con tendencia monopolista, que, hasta hace algún tiempo atrás ha tomado otro giro aplicando medidas para frenar el acelerado deterioro del medio ambiente. Algunas instituciones gubernamentales, con el esfuerzo de grupos ambientalistas han desarrollado e impulsado normatividades que regulan las prácticas de explotación de recursos naturales como la extracción de petróleo.

En Colombia las operaciones derivadas de la industria petrolera generan muchos residuos, entre los cuales clasifican los residuos aceitosos, estos residuos particularmente son generados por las operaciones de perforación, completamiento, servicio a pozo y reacondicionamiento de pozos (workover), estando compuestas principalmente por lodos de perforación, fondos de tanques de almacenamiento, borras y salmueras de completamiento con alto contenido de aceite y algunas recolecciones de derrames de petróleo, los cuales deben someterse a un tratamiento especial cuyos procesos generan como resultado el aprovechamiento al máximo del residuo, es decir lo denominado como residuo aceitoso es la materia prima a aprovechar, puesto que al recuperar gran parte del volumen inicial, junto a sus propiedades físicas y químicas se genera un ahorro significativo para la empresa y un desecho mínimo a ser dispuesto.

La realización del tratamiento y todos los procesos pertinentes al manejo de residuos aceitosos tiene su origen en el diseño e implementación de un plan estratégico de acción donde se establezcan los pasos a seguir, entre los cuales está la clasificación del residuo aceitoso, la fuente que lo genera y el método

propio de tratamiento, incluyendo por su puesto la disposición final del desecho, el cual debe cumplir con todas las reglamentaciones existentes en la norma nacional para ser depositado.

Para disponer un desecho la prioridad radica en que su nivel de contaminación al medio ambiente sea minimizado, por lo cual se presentan técnicas de biorremediación tales como los tratamientos biológicos in-situ o ex-situ, los tratamientos fisicoquímicos y el tratamiento térmico para el caso de los cortes de perforación. Entre estos métodos se encuentran técnicas tales como el landfarming, el bioventeo y la biorremediación mejorada como métodos de descontaminación con alto grado de éxito

Inicialmente en el capítulo primero se podrá encontrar un diverso número de definiciones para residuos y normativas en cuanto a la legislación ambiental a nivel mundial, para luego en el capítulo segundo dar claridad a la legislación colombiana en lo que respecta a la disposición y manejo de residuos aceitosos.

En el capítulo tres se encontrara una clara descripción de cada residuo generado en actividades de exploración y producción de hidrocarburos, con sus respectivas características fisicoquímicas.

Ya en el capítulo cuarto se nombran claramente las tecnologías de tratamiento y disposición existentes a nivel mundial, basando dicha consulta en la FRT RT (Federal Remediation Technologies Round Table) ente estadounidense encargado de la investigación y desarrollo de todas las tecnologías allí nombradas.

En el capítulo quinto se mencionan las implicaciones técnicas de un derrame de hidrocarburo, para luego dar paso al capítulo sexto que es la consulta técnica de este trabajo, en donde se aprecia la maquinaria utilizada, los procesos que sufren

los residuos para su tratamiento y disposición final en el campo LA CIRA INFANTAS.

1. GENERALIDADES

Antes de entrar en detalle en el manejo de residuos aceitosos generados por la industria petrolera, se hace imperante definir qué es un residuo, debido a su afectación al medio ambiente y por consiguiente a los individuos pertenecientes al entorno. A continuación se ofrecen varias definiciones de residuos.

1.1 DEFINICIÓN DE RESIDUO / DESECHO⁽¹⁾

En primer lugar se iniciará analizando el significado de dos términos ampliamente utilizados en la bibliografía: "desecho" y "residuo", para establecer si es posible o no su uso como sinónimos. De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española ⁽²⁾ se tienen las siguientes definiciones:

Desecho

- Aquello que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de algo.
- Cosa que, por usada o por cualquier otra razón, no sirve a la persona para quien se hizo.
- Residuo, basura.

Residuo

- Parte o porción que queda de un todo.
- Aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo.
- Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo.

De acuerdo a estas definiciones resulta claro que es posible utilizar ambos términos indistintamente.

Al momento de establecer qué se considera "residuo", de la propia definición se entiende claramente que se trata de un término intrínsecamente subjetivo pues depende de los actores involucrados. Uno de los ejemplos más claros de que se está frente a un término subjetivo es que quien decide si un determinado objeto continúa siendo útil o no es su propietario.

Otro ejemplo es cuando existe posibilidad de reciclaje y por lo tanto el residuo deja de serlo, transformándose en materia prima de otro proceso.

Se han hecho diversos intentos de adoptar una definición objetiva de "residuo", sin embargo aún hoy persiste cierto grado de incertidumbre. Por esta razón muchas legislaciones incluyen en su texto la definición de "residuo" por la que han optado.

A continuación se presentan ejemplos de definiciones adoptadas para el término "residuo" en distintos ámbitos y con diferentes alcances.

Organización de las Naciones Unidas⁽³⁾. Todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente⁽⁴⁾. Incluye cualquier material descrito como tal en la legislación nacional, cualquier material que figura como residuo en las listas o tablas apropiadas, y en general cualquier material excedente o de desecho que ya no es útil ni necesario y que se destina al abandono.

Convenio de Basilea ⁽⁵⁾. Las sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional.

Programa Regional de Manejo de Residuos Peligrosos del CEPIS ⁽⁶⁾. Todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) ⁽⁷⁾. Todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir, que ha sido abandonado, reciclado o considerado inherentemente residual.

Normatividad Colombiana. Cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos aquellos provenientes del barrido de áreas públicas.

Se debe tener en cuenta que cuando los residuos se aprovechan para otro fin diferente del inicial, se habla de subproductos. El uso y aprovechamiento de estos subproductos es de vital importancia a la hora de establecer una producción respetuosa con el medio ambiente que minimice los residuos y contribuya al desarrollo sostenible.

Según el principio tres de la declaración de Río ⁽⁸⁾ sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992 “el derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las necesidades actuales y futuras”.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS ⁽⁹⁾

Todos los residuos deben ingresar a un sistema de gestión que incluye manejo, tratamiento, transporte y disposición final. El sistema de gestión depende del tipo de residuo que se considere, debiéndose prestar especial atención a la gestión de los residuos peligrosos por su capacidad inherente de provocar efectos adversos. Es por esta razón que debe quedar clara la clasificación de residuos utilizada, a fin de minimizar los riesgos derivados de un residuo peligroso.

Los residuos pueden ser clasificados utilizando diferentes criterios, así se tiene por ejemplo: estado, origen, tipo de tratamiento al que serán sometidos o potenciales efectos derivados del manejo.

1.2.1 Clasificación por estado. En este caso un residuo es definido de acuerdo al estado físico en que se encuentra, los grupos que pertenecen a este caso son: sólidos, semisólidos, líquidos y gaseosos.

Muchas veces en la categoría líquidos se incluyen únicamente los acuosos diluidos y no otros como los aceites usados, solventes orgánicos, ácidos o álcalis, los cuales suelen incluirse dentro de la categoría de residuos sólidos. Esto responde a un tema de gestión, ya que los residuos acuosos diluidos generalmente serán tratados en una planta de tratamiento de efluentes líquidos, mientras que el resto tendrá un tratamiento particular.

1.2.2 Clasificación por origen. Se refiere a una clasificación sectorial y no existe límite en cuanto a la cantidad de categorías o agrupaciones que se pueden realizar. A continuación se mencionan algunas categorías:

- Domiciliarios, urbanos o municipales

- Industriales
- Agrícolas, ganaderos y forestales
- Mineros
- Hospitalarios o de Centros de Atención de Salud
- De construcción
- Portuarios
- Radiactivos

Una denominación de uso frecuente es asimilable a la de residuo urbano que se utiliza para los residuos generados en cualquier actividad y tiene características similares a los residuos urbanos y por lo tanto pueden ser gestionados como tales.

1.2.3 Clasificación por tipo de tratamiento al que serán sometidos. Este criterio de clasificación es útil para orientar la gestión integral de residuos de un país y particularmente útil cuando el objetivo es definir la infraestructura que se necesita para el tratamiento y la disposición final de los residuos. Es así que se pueden definir entre otros:

- Residuos asimilables a residuos urbanos y que por lo tanto se pueden disponer en forma conjunta.
- Residuos para los cuales la incineración es el tratamiento idóneo.
- Residuos que se deben disponer en rellenos de seguridad.

- Residuos generados en grandes cantidades y que por lo que requieren tratamiento particular.
- Residuos pasibles de ser sometidos a un proceso de valorización.

1.2.4 Clasificación por los potenciales efectos derivados del manejo

a) Residuos peligrosos. Son aquellos residuos que por su naturaleza son inherentemente peligrosos, produciendo efectos adversos para la salud o el ambiente. Estos residuos serán motivo de un análisis minucioso que se desarrollará posteriormente.

b) Residuos peligrosos no reactivos. Son residuos peligrosos que han sufrido algún tipo de tratamiento por medio del cual han perdido su naturaleza reactiva.

c) Residuos inertes. Son los residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.

d) Residuos no peligrosos. Son los que no pertenecen a ninguna de las tres categorías anteriores.

1.3 RESIDUOS PELIGROSOS

Un residuo peligroso se define como "Un residuo en cualquier estado físico que debido a su cantidad, concentración y sus características físicas, químicas o infecciosas puede:

1. Causar o contribuir significativamente a incrementar la mortalidad o las enfermedades serias, irreversibles o que produzcan incapacitación.

2. Poseer un peligro substancial o potencial para la salud humana o el ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

De acuerdo a la Norma Técnica Ecológica 001/, se identifican como residuos peligrosos, cualquier residuo que presente una o más de las siguientes características:

- Inflamabilidad
- Corrosividad
- Reactividad
- Explosividad
- Toxicidad

1.3.1 Inflamabilidad. La inflamabilidad es la característica utilizada para definir como peligroso, aquellos residuos que pudieran causar un incendio, durante el transporte, almacenamiento o disposición. Ejemplos de residuos inflamables incluyen residuos de aceites y solventes gastados. Según el art 25 de la resolución 2309 se considera un residuo inflamable si una muestra representativa del mismo tiene alguna de las siguientes propiedades:

1. Es un líquido que en solución acuosa contiene más del 24% en volumen de alcohol y tiene una temperatura de inflamación inferior a 60 grados Centígrados (140 grados Fahrenheit)

2. No es un líquido, pero es capaz de causar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (bajo presiones y temperaturas normales).
3. Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes (USEPA, 1990).

1.3.2 Corrosividad. La corrosividad indicada por el pH, se escogió como característica de identificación de un residuo peligroso debido a que los residuos con alto o bajo pH pueden reaccionar peligrosamente con otros residuos o causar contaminantes tóxicos que migren de ciertos residuos. Ejemplos de residuos corrosivos incluyen residuos ácidos y salmuera usada en la manufactura del acero. La corrosión del acero es un primer indicador de un residuo peligroso ya que un residuo capaz de corroer el acero puede escapar de los tambores y liberar otros residuos.

Un residuo presenta la característica de corrosividad si una muestra representativa del mismo tiene cualquiera de las siguientes propiedades:

1. Es acuoso y tiene un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5
2. Es un líquido y corroe el acero (SAE 1020) a velocidades mayores de 6.35 mm (0.250 in) por año a una temperatura de prueba de 55 grados Celsius (130 grados Fahrenheit) (USEPA, 1990).

1.3.3 Reactividad. La reactividad es una característica de residuo peligroso, ya que los residuos inestables pueden poseer un problema explosivo en cualquier estado del ciclo del manejo del residuo. Ejemplos de residuos reactivos incluyen el agua proveniente de las operaciones de trinitrotolueno y los solventes gastados de cianuro.

Un residuo presenta la característica de reactividad si una muestra representativa del mismo tiene cualquiera de las siguientes propiedades:

1. Es normalmente inestable y presenta fácilmente cambios violentos sin detonación.
2. Reacciona violentamente con agua y cuando se combina con ella forma mezclas potencialmente explosivas, genera vapores, gases o humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar desequilibrio ecológico y daños al ambiente.
3. Es un residuo que contiene cianuros o sulfuros, el cual cuando es expuesto a condiciones de pH entre 2 y 12.5 puede generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades suficientes para presentar un daño a la salud humana o al ambiente.
4. Es capaz de descomponerse fácilmente por detonación o reaccionar a presión y temperaturas normales.
5. Es capaz de presentar reacciones de detonación si se somete a una fuente poderosa de iniciación o si se calienta bajo confinamiento (USEPA, 1990).

1.3.4 Explosividad. Un residuo presenta la característica de explosividad si una muestra representativa del mismo tiene cualquiera de las siguientes propiedades (Art 24 resolución 2309/86):

1. Es más sensible a golpes o fricción que el dinitrobenceno.
2. Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 grados Centígrados y una atmósfera de presión (Norma técnica ecológica 001/88).

1.3.5 Toxicidad. Se denomina a la propiedad que tiene una sustancia, elemento o compuesto de causar daños en la salud humana o la muerte de un organismo vivo (artículo 16 del Decreto 1594 de 1984⁽¹⁰⁾ del Ministerio de Salud).

Un residuo tóxico en contacto con un organismo viviente es capaz de producir la muerte, herir o en alguna forma dañar al organismo. Estas sustancias tóxicas son peligrosas dependiendo de la exposición al riesgo y la manera en la cual tal desecho se maneje (USEPA, 1990).

Efectos adversos tales como carcinogenicidad, mutagenicidad y teratogenicidad son generalmente contraídos por el contacto con sustancias tóxicas. Estas propiedades intrínsecas definen los materiales tóxicos. Sin embargo, los términos "tóxico" y "peligroso" no son intercambiables. Las sustancias peligrosas pueden tener propiedades intrínsecas y extrínsecas. Por ejemplo, las propiedades extrínsecas de explosividad, inflamabilidad y reactividad no están referidas a la toxicidad química. En suma, la "toxicidad" denota la capacidad de una sustancia para producir daño, mientras "peligroso" denota la probabilidad de que el daño resultará del uso o contacto con una sustancia (USEPA, 1990).

Se puede causar un daño agudo a los humanos o a los animales cuando los residuos tóxicos son inhalados, ingeridos o por el contacto por la piel. La toxicidad aguda es generalmente medida en términos de concentración de dosis letal (LD50) en el cual el 50% de la población de prueba morirá debido a la exposición de una sustancia en particular bajo la condición prescrita (USEPA, 1990). Un residuo presenta la característica de toxicidad si una muestra representativa del mismo tiene la siguiente característica:

1. Posee un peligro substancial o potencial para la salud humana o el ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

1.3.6 Clasificación general de los residuos peligrosos ⁽¹¹⁾

1. Residuos inorgánicos.

a) Ácidos y álcalis. Se encuentran entre los componentes principales de la cantidad total de los residuos peligrosos generados por diversos sectores de la industria, aunque en términos de cantidad, los residuos ácidos provienen principalmente de la preparación de superficies y acabado de metales.

El principal peligro de los ácidos y álcalis está en su acción corrosiva, complicada en algunos casos, por la presencia de constituyentes tóxicos.

b) Residuos de Cianuro. Se generan principalmente en la industria del acabado de metales y en el tratamiento a altas temperaturas de ciertos aceros. El peligro asociado con los residuos del cianuro es su toxicidad aguda.

c) Residuos de asbestos. Normalmente surgen de los residuos de recubrimientos, estaciones de energía, plantas de manufactura industrial, fábricas de gas, astilleros, hospitales y establecimientos educacionales. Los materiales que contienen asbestos pueden también aparecer como residuos provenientes de la demolición o reconstrucción de locomotoras y vagones ferroviarios y de la construcción y demolición de sitios.

d) Otros residuos sólidos. Se generan de una variedad de fuentes de las cuales las más importantes son la fundición y refinamiento de metales. Los polvos y lodos generados de estos procesos contienen en su mayoría metales tóxicos incluyendo níquel, arsénico, zinc, mercurio, cadmio y plomo.

e) Residuos aceitosos. Los residuos aceitosos se generan principalmente de proceso, uso y almacenamiento de aceites minerales. Algunos ejemplos son residuos de lubricación y fluidos hidráulicos, lodos de fondos de tanques de

almacenamiento de aceites. En algunos casos estos materiales puede contaminarse con metales tóxicos (por ejemplo, tanques de almacenamiento de gasolina con plomo, etc.)

2. Residuos orgánicos. A este tipo de residuos pertenecen:

a) Solventes halógenos. Se generan primordialmente de operaciones de limpieza en seco, limpieza de metal en la industria ingenieril y en una cantidad mucho menor, de los procesos de desengrasado y en las industrias textil y de curtiduría. El peligro de estos residuos está asociado con su toxicidad, movilidad y la relativa alta persistencia en el ambiente.

b) Residuos de solventes no halogenados. Comprenden un gran número de hidrocarburos e hidrocarburos oxigenados. Algunos de los más utilizados son el tolueno, metanol, isopropanol y etanol. Estos encuentran una amplia aplicación a lo largo de la industria en la producción de pinturas, tintas, adhesivos, resinas, preservativos de madera hechos a base de solventes, saborizantes de alimentos, cosméticos, así como en la limpieza de equipo y plantas.

c) Residuos de policloruros de Bifenilo (PCBs). Se generan de la manufactura de PCBs y del equipo en que fueron utilizados, principalmente como fluidos dieléctricos en transformadores y capacitores, también como fluidos hidráulicos y de transferencia de calor. El peligro principal de los PCBs está asociado con su alto potencial de bio-acumulación.

d) Residuos de pinturas y resinas. Se generan de una variedad de formulaciones y otros procesos químicos terciarios, así como de la aplicación de pinturas y resinas a productos terminados. Generalmente, son combinaciones de solventes y materiales poliméricos incluyendo en algunos casos metales tóxicos.

e) Residuos de biocidas. Se generan tanto en la manufactura como en la formulación de biocidas y en el empleo de estos compuestos en la agricultura, horticultura y en otras industrias.

f) Residuos orgánicos putrescibles. Los residuos orgánicos putrescibles son aquellos residuos de la producción de aceites comestibles, desperdicios de rastros y otros productos provenientes de animales. El manejo apropiado de residuos putrescibles es de particular importancia en el desarrollo de países donde las condiciones climatológicas extremas pueden incrementar el posible riesgo a la salud asociado con estos residuos orgánicos.

g) Residuos poco peligrosos o de gran volumen. Estos residuos incluyen aquellos residuos que con base en sus propiedades intrínsecas presentan una relativa baja peligrosidad, pero pueden presentar problemas debido a sus grandes volúmenes. Algunos ejemplos son: lodos de las perforaciones provenientes de la extracción de petróleo y gas, cenizas finas del combustóleo quemados en plantas de energía, desechos de minas o escorias metalíferas.

h) Residuos diversos. En adición a las clases de residuos descritas anteriormente existen un número de otros tipos de residuos que no han sido agrupados. Estos incluyen residuos infecciosos con afección a tejidos humanos o animales, compuestos químicos redundantes que pueden haberse deteriorado o excedido su período de almacenamiento y provienen de tiendas de menudeo, almacenes comerciales y tiendas gubernamentales e industriales. Aún cuando estos residuos no presentan una gran proporción del total de la generación de residuos peligrosos, se deben llevar a cabo medidas especiales para asegurar una disposición adecuada.

1.3.7 Residuos peligrosos conforme la resolución 2309 de 1986 de Colombia (12)

a) Residuos Especiales. Para los efectos de esta resolución se denominan Residuos Especiales, los objetos, elementos o sustancias que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan y que sean patógenos, tóxicos, combustibles, inflamables, explosivos, radiactivos o volatilizables y los empaques y envases que los hayan contenido, como también los lodos, cenizas y similares. Quedan incluidos en esta denominación, los residuos que en forma líquida o gaseosa se empaquen o envasen.

b) Residuo patógeno o infectocontagioso. Se entiende por residuo patógeno o infectocontagioso, aquel que por sus características físicas, químicas o biológicas puede causar daño a la salud humana o animal por ser reservorio o vehículo de infección.

c) Residuo Tóxico. Se entiende por residuo tóxico, aquel que por sus características físicas o químicas, dependiendo de su concentración y tiempo de exposición, puede causar daño a la salud humana o al medio ambiente.

d) Residuo combustible. Se entiende por residuo combustible, aquel que puede arder por acción de un agente exterior, como chispa o cualquier fuente de ignición.

e) Residuo inflamable. Se entiende por residuo inflamable, aquel que puede arder espontáneamente bajo ciertas condiciones de presión y temperatura.

f) Residuo explosivo. Se entiende por residuo explosivo, aquel que genera grandes presiones en su descomposición instantánea.

g) Residuo radiactivo. Se entiende por residuo radiactivo, aquel que emita radiaciones en niveles superiores a las radiaciones naturales de fondo.

h) Residuo volatilizable. Se entiende por residuo volatilizable, aquel que por su presión de vapor se evapora o volatiliza a temperatura ambiente.

i) Residuos incompatibles. Denomínense residuos incompatibles aquellos que, cuando se mezclan o entran en contacto, pueden reaccionar produciendo efectos dañinos que atentan contra la salud humana, contra el medio ambiente o contra ambos.

2. LEYES Y NORMÁS QUE SE APLICAN EN COLOMBIA.

Este capítulo da a conocer algunos aspectos legales, como leyes, decretos, resoluciones, relacionadas con el manejo de residuos a nivel nacional.

En Colombia se han aplicado ciertos modelos ambientales basados en normativas extranjeras, sin embargo como iniciativa propia del pueblo colombiano por velar del bienestar del medio ambiente, en la Constitución Política de 1991⁽¹³⁾, se abrió un capitulo en la historia de la patria por buscar el equilibrio entre las acciones llevadas a cabo por el hombre y la integridad del medio ambiente, consagrando derechos individuales y colectivos en cabeza de los ciudadanos y de las empresas, relacionadas con la protección de los recursos naturales y creando entes de vigías para el cumplimiento de las normas en pro de la preservación, restauración y defensa del medio ambiente.

2.1 NORMÁS AMBIENTALES DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA

En la estructura de la Constitución Colombiana, los artículos alusivos al medio ambiente se agrupan en seis campos de acción, los cuales se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1 Campos de acción de la Constitución Política Colombiana alusivos al medio ambiente y sus respectivos artículos.

CAMPOS DE ACCIÓN DE LA CONSTITUCIÓN COLOMBIANA ALUSIVOS AL MEDIO AMBIENTE	ARTÍCULOS APLICABLES
Medio Ambiente como derecho colectivo, fundamental y principio rector del Estado.	7, 8, 49, 67, 79, 80, 81, 82, 95 y 215
Medio Ambiente como derecho colectivo social o fundamental	79, 88 y 330

CAMPOS DE ACCIÓN DE LA CONSTITUCIÓN COLOMBIANA ALUSIVOS AL MEDIO AMBIENTE	ARTÍCULOS APLICABLES
Medio Ambiente como paradigma de un nuevo modelo de desarrollo estableciendo un vínculo entre el medio ambiente y desarrollo	333, 334, 339, 340 y 36
Medio Ambiente como condicionante de la propiedad privada, la economía y las empresas	58, 63 y 66
Medio Ambiente como componente de la política internacional	226
Medio Ambiente en relación con la estructura organizativa y funcional del Estado	267, 268, 277, 282, 289, 298, 310, 313, 317, 330 y 331
Fiscalización y Control de la Gestión Ambiental, función encomendada las Contralorías y dentro de la cual se incluye el ejercicio de control financiero, de gestión y de resultados fundamentados en la eficiencia, la economía, la equidad y la valoración de costos ambientales, así como la obligatoriedad del Contralor de presentar un informe anual sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente	267 y 268

Fuente: Constitución Política de Colombia

2.2 LEYES Y DECRETOS PARA EL MEDIO AMBIENTE

A continuación, se citan y describen brevemente las leyes y decretos de mayor relevancia respecto al tema de medio ambiente

2.2.1 Ley 99 de 1993⁽¹⁴⁾: Fundamentada en la concepción del desarrollo sostenible y apoyado en los conceptos de la Cumbre de Río de Janeiro, la gestión ambiental sufrió un vuelco radical, quedando estructurada de la siguiente manera:

- Principios ambientales, la tabla 2 recoge algunos de tales principios en la medida en que trascienden a proyectos de la industria del petróleo.
- Sistema Nacional Ambiental –SINA.
- Planificación y Gestión (Instrumentos económicos–Tasas, Instrumentos de gestión, Licencias).
- Licencias Ambientales (Estudios de Impacto Ambiental y Planes de Manejo Ambiental).
- Participación ciudadana (Derecho de intervención, Audiencias Públicas, Consultas obligatorias).
- Control y Vigilancia.

Tabla 2 principios ambientales de la ley 99/93 que trascienden a proyectos de la industria del Petróleo.

PRINCIPIO	COMENTARIOS
El proceso de desarrollo económico y social se orientará según los principios del desarrollo sostenible (Declaración de Río de Janeiro).	Reconoce la necesidad de utilizar recursos del ambiente para el desarrollo económico y social, pero establece el uso racional ya que los recursos son finitos.
La biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad, deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible.	El concepto de biodiversidad se aplica también a la diversidad de razas y culturas del país
Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial.	En la práctica estas áreas están vedadas a la actividad industrial o exploratoria.
En la utilización de los recursos hídricos, el consumo humano tendrá prioridad sobre cualquier otro uso.	Obliga, en los proyectos, a estudiar usos del agua para decidir sobre captaciones.

PRINCIPIO	COMENTARIOS
Principio de precaución.	La adopción de medidas para evitar la degradación ambiental no requiere certeza científica.
El paisaje, por ser patrimonio común, deberá ser protegido.	La afectación del paisaje debe ser analizada en los proyectos.
El EIA será el instrumento básico para la toma de decisiones	Define el peso de la variable ambiental en la toma de decisiones sobre los proyectos.
El manejo ambiental del país será descentralizado, democrático y participativo.	Reafirma la participación ciudadana en las decisiones ambientales relacionadas con la ejecución de proyectos que puedan afectar el medio ambiente.

Esta ley establece como competencia de las autoridades ambientales y de los organismos fiscalizadores, vigilar que toda actividad se desarrolle bajo el concepto del Desarrollo Sostenible, haciendo indispensable que en todo proceso de planeación de actividades se tenga en cuenta medidas o acciones contempladas en los respectivos Estudios de Impacto Ambiental - EIA, Planes de Manejo Ambiental - PMA, Requerimientos Ambientales y Planes de Gestión Ambiental Institucional.

La Licencia Ambiental entendida como la autorización mediante acto administrativo que otorga la autoridad ambiental competente a una persona natural o jurídica para la ejecución de un proyecto, obra o actividad que conforme a la Ley y a los reglamentos, puede producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; en ella se establecen los requisitos, obligaciones y condiciones que el beneficiario debe cumplir para prevenir, mitigar, corregir, compensar y manejar los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada. Esta norma establece dos aspectos importantes con relación

al agua: Tasas retributivas y compensatorias por vertimientos (Art.42) y Tasas por utilización de las aguas superficiales y subterráneas (Art. 43).

Los Planes de Manejo Ambiental-PMA son una alternativa de manejo ambiental para proyectos y/o actividades que no ocasionan mayores daños o impactos al medio ambiente (proyectos de bajo y mediano impacto), mediante los que se establece de manera detallada las acciones que se requieren para prevenir, mitigar, controlar, compensar y corregir, los posibles efectos o impactos ambientales negativos causados en desarrollo de un proyecto, obra o actividad; incluyendo además los planes de seguimiento, evaluación, monitoreo y contingencia. Se puede concluir que los Planes de Manejo Ambiental son estudios o documentos que, basados en un diagnóstico de la situación actual de los recursos naturales y sociales (línea base), son punto de partida para establecer los posibles impactos generados por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad humana, que definen las acciones y actividades de preservación, mitigación, corrección y compensación por los posibles impactos o efectos del proyecto, obra o actividad sobre el entorno natural o medio ambiente.

El incumplimiento de cualquiera de estas fases, aprobadas previamente por la autoridad ambiental, puede dar lugar a graves efectos, no sólo en la salud humana sino en el entorno natural, que pueden valorarse a fin de cuantificar monetariamente los daños en la salud humana (costos evitados) o en los recursos naturales, patrimonio del Departamento (costo de oportunidad).

2.2.2 Ley 99 de 1993 y decreto 2820 del 5 de agosto de 2010 ⁽¹⁵⁾. En Colombia, la ley 99/93, en su artículo 1, estableció los principios generales que rigen la política Ambiental colombiana y que, por tanto, orientan la gestión ambiental de las actividades industriales.

El Decreto 2820 del 5 de agosto de 2010 emitido por el **MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL** “Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales”

A continuación nos permitimos transcribir un aparte de dicho decreto.

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA

En ejercicio de sus facultades constitucionales, en especial de lo establecido en el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política y en desarrollo de lo previsto en los artículos 53 y siguientes de la Ley 99 de 1993.

DECRETA

TÍTULO II

COMPETENCIA Y EXIGIBILIDAD DE LA LICENCIA AMBIENTAL

ARTÍCULO 8.- COMPETENCIA DEL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, otorgará o negará de manera privativa la Licencia Ambiental para los siguientes proyectos, obras o actividades:

1. En el sector hidrocarburos:

a. Las actividades de exploración sísmica que requieran la construcción de vías para el tránsito vehicular y las actividades de exploración sísmica en las áreas marinas del territorio nacional cuando se realicen en profundidades inferiores a 200 mts;

b. Los proyectos de perforación exploratoria, por fuera de campos de producción de hidrocarburos existentes, de acuerdo con el área de interés que declare el peticionario;

c. La explotación de hidrocarburos que incluye las instalaciones propias de la actividad y obras complementarias incluidas el transporte interno del campo por ductos y su almacenamiento interno, las vías y demás infraestructura asociada y conexas;

d. El transporte y conducción de hidrocarburos líquidos y gaseosos que se desarrollen por fuera de los campos de explotación que impliquen la construcción y montaje de infraestructura de las líneas de conducción con diámetros iguales o superiores a 6 pulgadas (15.24cm), incluyendo estaciones de bombeo y/o reducción de presión y la correspondiente infraestructura de almacenamiento y control de flujo; salvo aquellas actividades relacionadas con la distribución de gas natural de uso domiciliario, comercial o industrial;

e. Los terminales de entrega y estaciones de transferencia de hidrocarburos líquidos, entendidos como la infraestructura de almacenamiento asociada al transporte por ductos;

f. La construcción y operación de refinerías y los desarrollos petroquímicos que formen parte de un complejo de refinación.

El análisis de riesgos involucra el conocimiento de los sistemas involucrados en el proyecto, los productos o sustancias a manejar (crudo, agua, gas, etc.), y sus principales características como medio de predecir su comportamiento.

2.2.3 Decreto- Ley 2811 de 1974⁽¹⁶⁾. Contiene las normas técnicas de manejo, uso, aprovechamiento, explotación, conservación, preservación, protección y

restauración de los recursos naturales renovables, armoniza la normatividad en materia de aguas, suelos, bosques y fauna buscando de esta manera un manejo integral de los recursos naturales. Dentro de su contenido se tienen: antecedentes, definiciones, política ambiental, normas generales, asuntos ambientales de ámbito internacional, medios de desarrollo de la política ambiental, normas de preservación del ambiente por disposición de residuos y desechos químicos, tóxicos y radioactivos; propiedad, uso e influencia ambiental de los recursos naturales renovables, dominio de los recursos naturales renovables, modos de adquirir el derecho al uso (Permisos, concesiones, autorizaciones y licencias), limitaciones al dominio; reglamento para el control y la protección de la calidad del aire; reglamentación de las aguas y modos de manejo, así mismo establece que la utilización del agua con fines lucrativos por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas retributivas y compensatorias (Art. 159).

A continuación se mencionan algunos de los artículos más relevantes respecto al tema de desechos.

Artículo 3: De acuerdo con los objetivos enunciados, el presente Código regula: en el numeral 1, los residuos, basuras, desechos y desperdicios.

Artículo 34: En el manejo de residuos, basuras, desechos y desperdicios, se observarán las siguientes reglas:

a). Se utilizarán los mejores métodos, de acuerdo con los avances de la ciencia y la tecnología, para la recolección, tratamiento, procesamiento o disposición final de residuos, basuras, desperdicios y, en general, de desechos de cualquier clase.

b). La investigación científica y técnica se fomentará para:

- Desarrollar los métodos más adecuados para la defensa del ambiente, del hombre y de los demás seres vivientes.
- Reintegrar al proceso natural y económico los desperdicios sólidos, líquidos y gaseosos, provenientes de industrias, actividades domésticas o de núcleos humanos en general.
- Sustituir la producción o importación de productos de difícil eliminación o reincorporación al proceso productivo.
- Perfeccionar y desarrollar nuevos métodos para el tratamiento, recolección, depósito y disposición final de los residuos sólidos, líquidos o gaseosos no susceptibles de nueva utilización.

Artículo 35: Se prohíbe descargar, sin autorización, los residuos, basuras y desperdicios, y, en general, desechos que deterioren los suelos o, causen daño o molestia a individuos o núcleos humanos.

Artículo 36: Para la disposición o procesamiento final de las basuras se utilizarán, preferiblemente, los medios que permitan:

- a). Evitar el deterioro del ambiente y de la salud humana.
- b). Reutilizar sus componentes.
- c). Producir nuevos bienes.
- d). Restaurar o mejorar los suelos.

Artículo 38: Por razón del volumen o de la calidad de los residuos, las basuras, desechos o desperdicios, se podrá imponer a quien los produce la obligación de

recolectarlos, tratarlos o disponer de ellos, señalándole los medios para cada caso.

Artículo 39: Para prevenir y para controlar los efectos nocivos que puedan producir en el ambiente el uso o la explotación de recursos naturales no renovable, podrán señalarse condiciones y requisitos concernientes a:

a). El uso de aguas en el beneficio o el tratamiento de minerales, de modo que su contaminación no impida ulteriores usos de las mismas aguas, en cuanto estos fueren posibles.

b). El destino que deba darse a las aguas extraídas en el desagüe de minas.

c). El uso de aguas en la exploración y explotación petrolera, para que no produzca contaminación del suelo ni la de aguas subterráneas.

d). El uso de aguas utilizadas para la recuperación secundaria de yacimientos de hidrocarburos o gases naturales, para que no produzcan riesgos o perjuicios ambientales.

2.4 NORMATIVIDAD EXTRANJERA COMO MODELO DE APLICACIÓN EN LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA.

En Colombia las normas pertinentes al manejo ambiental están basadas en la norma estadounidense Louisiana 29B ⁽¹⁷⁾.

Esta norma estadounidense es la pionera de los de las reglamentaciones dadas a todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente. Específicamente en el reglamento de Louisiana en su título 43, parte XIX, orden estatal 29B. Capítulo 3 están contemplados todos aquellos criterios y parámetros tenidos en cuenta para el manejo y disposición final de todos los residuos ocasionados por

actividades de la industria, pertinentes al control de la contaminación, almacenamiento in situ, tratamiento y disposición de residuos de las actividades de exploración y producción petrolera que se generan en la perforación y producción de petróleo y gas.

En Louisiana, las fosas que contienen residuos no peligrosos en campos petroleros se pueden enterrar mediante la mezcla de suelo con los residuos, siempre y cuando el material a ser enterrado cumpla con los siguientes criterios descritos por el Estado de Louisiana en la Orden 29-b, del 20 de Octubre de 1990.

- pH 6-9
- contenido total de metales (ppm) en los residuos mezclados con la tierra no excederá
 - Arsénico 10 ppm
 - Cadmio 10 ppm
 - Cromo 500 ppm
 - Plomo 500 ppm
 - Mercurio 10 ppm
 - Plata 200 ppm
 - Selenio 10 ppm
 - Zinc 500 ppm
- Contenido de humedad inferior al 50% en peso
- Conductividad eléctrica <12 mmohm/cm
- Crudo y grasas <3% en peso
- El tope de la mezcla se debe enterrar mínimo 5 pies bajo el nivel del suelo y luego ser cubierta con 5 pies de tierra nativa.
- La parte inferior de la fosa debe estar por lo menos 5 pies por encima de la lamina de agua en época de lluvias

Esta norma se puede encontrar disponible en línea en la siguiente dirección:

<http://dnr.louisiana.gov/title43/43v19.pdf#page=21>.

La norma lousiana 29B hace referencia en sus apartes a la prueba TCLP (prueba de lixiviación y caracterización de los residuos tóxicos)

Tabla 3. Nivel de regulación de una sustancia contaminante

Código EPA	Contaminante	Nivel de regulación (mg/l)
D004	Arsénico (As)	0,5
D005	Bario (Ba)	100
D018	Benceno	0,5
D006	Cadmio (Cd)	1,0
D019	Tetracloruro de carbono	0,5
D020	Clordane	0,03
D021	Cloruro de benceno	100
D022	Cloroformo	6,0
D007	Cromo (Cr)	5,0
D027	1,4- Diclorobenceno	7,5
D028	1,2- Dicloroetano	0,5
D029	1,1- Dicloroetileno	0,7
D030	2,4- Dinitrotolueno	0,13
D012	Endrina	0,02
D031	Heptaclouro	0,008
D032	Hexacloruro de benceno	0,13
D033	Hexacloruro de dibutaleno	0,5
D034	Hexacloruro de etano	3,0
D008	Plomo (Pb)	5,0
D013	Lindano	0,4
D009	Mercurio (Hg)	0,2
D014	Metoxido de cloro	10,0
D035	Metil etil cetona	200
D036	Nitrobenceno	2,0
D037	Pentacloruro de fenol	100
D010	Selenio (Se)	1,0
D011	Plata (Ag)	5,0
D039	Tetra cloruro de etileno	0,7
D040	Tricloroetileno	0,5
D041	2,4,5-Triclorofenol	400
D042	2,4,6-Triclorofenol	2,0
D043	Cloruro de vinilo	0,2

Fuente: <http://www.ehso.com/cssepa/TCLP.htm>

3. RESIDUOS GENERADOS POR LAS OPERACIONES DE EXPLORACION Y PRODUCCION.⁽¹⁸⁾

En las operaciones que se llevan a cabo en la industria del petróleo y gas, específicamente en la búsqueda y producción del recurso energético, se generan ciertos desechos los cuales son denominados como residuos especiales. Estos desechos no son tratados como cualquier desecho más, puesto que contienen altos compuestos tóxicos, que pueden generar impactos que comprometan seriamente el ambiente y por consiguiente a los individuos inmersos en él.

Como resultado de las operaciones a pozo tales como reacondicionamiento de pozos, perforación incluso en las operaciones de producción, se generan desechos denominados residuos aceitosos, estos son todas aquellos lodos, salmueras, polímeros, geles, espumas, emulsiones, grasas, aguas, y borras o fondo de tanques de almacenamiento, que contienen trazas de aceites provenientes de formación.

3.1 AGUA PRODUCIDA

El agua de producción se extrae con el petróleo o el gas producido. Este es el mayor volumen de residuos generados por la industria petrolera y del gas. En COLOMBIA, el agua producida es principalmente dispuesta para inyección al subsuelo en operaciones en tierra.

3.2 RESIDUOS DE OPERACIONES DE POZO

El segundo gran volumen de residuos generado por la industria proviene de la perforación, completamiento y operaciones de reacondicionamiento de pozos. Estos residuos incluyen cortes y lodos de perforación. Los lodos de perforación

pueden ser base agua, base aceite, sintéticos o con agua salada para mejorar su desempeño.

3.3 OTROS RESIDUOS ASOCIADOS

Estos residuos incluyen fondos de tanques, lodos de separadores, desechos aceitosos, arena producida, suelos contaminados, fluidos de reacondicionamiento de pozos, etc.

3.4 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS

3.4.1 Agua producida. El agua producida se refiere al agua que viene con el hidrocarburo durante la extracción, y puede incluir agua de formación, agua de inyección y cualquier químico adicionado en el pozo o durante el proceso de separación aceite/agua. El agua siempre contiene aceite soluble y disperso. El agua de la mayoría de campos petrolíferos contiene una variedad de componentes orgánicos e inorgánicos disueltos, sólidos suspendidos y aceite disperso.

Los mayores constituyentes inorgánicos solubles son: sodio, calcio, magnesio cloruros, carbonato, bicarbonato y sulfato. El ión más común es el cloruro. La concentración de cloruros está en el rango de menor a 10000 mg/l a más de 200000 mg/l, cationes tales como Potasio, Estroncio y Bario pueden estar presentes en concentraciones mayores a 10 mg/l.

En operaciones de off-shore el agua es tratada y el aceite disperso es removido para disponerse sobre borda de acuerdo a las normas establecidas. En la mayoría de operaciones en tierra en COLOMBIA, el agua es tratada e inyectada o dispuesta para operaciones de inyección de agua en recobro secundario. En off-shore estas opciones no son viables económicamente, esto es debido a la gran complejidad en el tratamiento del agua y sus sistemas.

3.4.2 Residuos de perforación, completamiento y reacondicionamiento de pozos. Los residuos generados por las operaciones de perforación incluyen: fluidos de perforación (lodos) y sólidos, cemento, agua salada, aceite, cortes de perforación (tales como shale, cal, sal, dolomita) el volumen de estos desechos depende del diámetro del pozo, de la profundidad, del sistema y lodo utilizado y otros factores de operación.

3.4.3 Residuos provenientes de operaciones de perforación.

3.4.3.1 Cortes de perforación. Estos consisten en fragmentos de roca inerte, y otros materiales sólidos provenientes de la formación e incluye cemento curado llevado a la superficie con el fluido de perforación. El fluido de perforación proveniente del pozo se descarga a la zaranda donde los cortes son separados del fluido. La separación del lodo y los cortes con los equipos no es completa. Típicamente los cortes húmedos generados por operaciones de perforación pueden contener 30 % en volumen de líquidos.

Imagen 1. Recortes de perforacion.



Fuente: Investigación de los autores

3.4.3.2 Fluidos de perforación. Estos fluidos son utilizados para: a) proveer presión hidrostática en el pozo para prevenir que fluidos provenientes de la formación entren al pozo. b) llevar los cortes a superficie. c) lubricar la sarta de perforación. d) enfriar y limpiar la broca y e) estabilizar el pozo.

Los lodos de perforación contienen cuatro partes esenciales:

- Líquidos – agua, aceite, materiales sintéticos o varias combinaciones
- Sólidos Activos - viscosificantes a menudo bentonita
- Sólidos inertes – densificantes a menudo barita.
- Otros aditivos para el control químico, físico, y propiedades biológicas del lodo. Además materiales condicionantes que pueden incluir polímeros, almidones, material lignítico y otros químicos.

Imagen 2 .Lodos de perforación retornando a superficie



Fuente:<http://www.petroblogger.com/2010/01/lodos-base-agua-fluidos-de-perforacion.html>

Los fluidos de perforación pueden ser divididos en tres categorías: base agua, base aceite, y base sintética. Los lodos base agua están hechos de agua fresca o salada y son usados en la mayoría de perforaciones. A menudo consisten en una fase continua de agua con sales disueltas, varios aditivos, polímeros y dispersantes. Los lodos base aceite son emulsiones agua en aceite. En los lodos sintéticos, el aceite es sustituido con varias cadenas de ésteres, éteres, acetales e hidrocarburos sintéticos. Los base aceite y los base sintéticos tienen unas ventajas operacionales sobre los base agua debido a su baja fricción y buena tolerancia a la temperatura, e inertes a las arcillas. Los lodos base sintética fueron desarrollados en respuesta a los requerimientos comparables a fluidos base aceite pero sin las implicaciones ambientales adversas de éstos. Una vez las operaciones de perforación han terminado nuevamente el pozo perforado debe ser completado, antes de empezar la producción.

3.4.3.3 Fluidos de completamiento y reacondicionamiento de pozos.

Típicamente son soluciones salinas, salmueras, polímeros y varios aditivos usados para prevenir el daño en el pozo durante operaciones las cuales preparan al pozo para producción. Los residuos de completamiento y reacondicionamiento de pozos incluyen fluidos hidráulicos, aceites usados, filtros, material pesante, surfactantes, lodos, agua producida ácidos, geles, y solventes.

3.4.3.4 Fluidos de tratamiento de pozo. Son usados para mejorar o restaurar químicamente o físicamente la productividad, alterando la formación después que el pozo ha sido completado. Estos fluidos incluyen ácidos, solventes etc. Las operaciones de servicio al pozo incluyen un amplio rango de operaciones, desde el remplazo de bombas, preparación y limpieza del pozo antes de la producción.

3.5 COMPOSICIÓN DE FLUIDOS EN PERFORACIÓN, COMPLETAMIENTO, REACONDICIONAMIENTO DE POZOS Y OPERACIONES DE ESTIMULACIÓN

Los fluidos provenientes de perforación acondicionamiento, completamiento y servicios al pozo pueden contener: salmueras, varios aditivos (tales como surfactantes inhibidores de corrosión, fluidos cementantes y aditivos) aceite de formación, sólidos (finos de formación, cortes de metal), y materiales poliméricos. Los fluidos para operaciones de estimulación pueden contener: ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, estabilizadores de arcilla, no emulsionantes, desenmulsificantes, agentes anti lodos, agentes secuestrantes de hierro, productos químicos, y el aceite de formación. La adecuada selección de químicos es esencial para minimizar la toxicidad. Además los fluidos pueden contener metales pesados.

Tabla 4. Clasificación de los residuos aceitosos

Tipo de Residuo	Descripción del Residuo	Actividad de generadora del residuo
1. Fluidos residuales Aceitosos de la operación y/o de Workover (Reacondicionamiento de pozos)	Fluidos residuales base aceite contaminados con ripio, sólidos y emulsiones, tales como arranques de pozo "postdrilling", fluidos de sumtanks, skimmers y/o trampas de grasa, contrapozos, entre otros. Residuos generados durante la reactivación de pozos. Salmueras para operaciones de control a pozos, contaminadas con crudo y sólidos.	Operación y producción
2. Geles, polímeros, espumas de limpieza, gomas y sus derivados y píldoras viscosas.	Retornos de trabajos de estimulación a pozos, basados en sustancias poliméricas sintéticas de medio y alto peso molecular, así como espumas siliconadas.	Producción trabajos a pozos.
3. Suelo contaminado con alto contenido de hidrocarburo.	Suelo (tierras) proveniente de contaminaciones con hidrocarburo durante perforaciones a pozos y trabajos de estimulación y reacondicionamiento de pozo. (estimulación a pozos)	Producción y, reacondicionamiento de pozos (Workover).
4. Fluidos aceitosos de producción contaminados con sólidos y emulsiones estables	Fluidos de producción provenientes, principalmente de saturaciones de la interface de gunbarrel y otras vasijas, tales como FWKO's.	Producción
5. Borrás o fondos	Sólidos y depósitos de fondo en vasijas que	Producción

Tipo de Residuo	Descripción del Residuo	Actividad de generadora del residuo
provenientes de la limpieza de vasijas en facilidades de producción	hacen parte de las facilidades de producción, tales como separadores, tanques de prueba, desnatadores (skimers), lechos de secado de plantas de inyección de agua, decantadores, gunbarrel, entre otras vasijas.	
6. Aguas aceitosas de lavado de vasijas.	Residuos líquidos aceitosos producto del lavado de vasijas como fractanks, catchtanks, tanques escuadra, tanques cilíndricos, entre otros, en esta clasificación se incluyen las aguas aceitosas que provienen de los contrapozos y contiene sólidos.	Producción, reacondicionamiento de pozos y Perforación.
7. Medios filtrantes provenientes de la limpieza de filtros de las plantas de inyección de agua	Material filtrante contaminado con sólidos e hidrocarburo.	Producción
8. Mogo Mogo	Emulsión parafínica con alto contenido de sólidos que forma un nata y proviene de la interfase de los tratadores térmicos.	Producción

Fuente: Proyecto AMIR Ecopetrol S.A.- Occidental Andina Inc. (Oxy)

3.6 OTROS RESIDUOS ASOCIADOS

Estos residuos son generados por el procesamiento del gas y las facilidades de producción, e incluye un amplio rango de residuos a menudo producidos en pequeñas cantidades. Estos residuos incluyen: desechos aceitosos, filtros, suelos contaminados, arenas producidas, fondos de tanques, lodos de separadores, residuos de unidades deshidratación y endulzamiento, emulsiones no tratadas, solventes y limpiadores utilizados.

El fondo de tanques y lodos de separadores pueden estar contaminados con aceite y grasas, cloruro de sal, metales pesados (tales como carbonato de calcio sulfato de calcio, sulfato de bario etc.) productos de corrosión, tratamientos químicos.

3.7 OPCIONES DE MINIMIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA PERFORACIÓN, COMPLETAMIENTO Y REACONDICIONAMIENTO DE POZOS

Los fluidos de perforación, completamiento y operaciones de reacondicionamiento de pozos, pueden subdividirse en sólidos y líquidos, pueden además clasificarse en contaminantes y no contaminantes. Residuos contaminados son los que contienen aceite, metales pesados, sólidos suspendidos. Residuos no contaminantes son aquellos que tienen niveles aceptables de estos parámetros. Desde las consideraciones ambientales, la opción recomendada para la perforación y nuevos pozos incluye las siguientes características:

- Incorporar la práctica de separación de los cortes no contaminados y lodos de perforación de los residuos contaminados.
- Este enfoque puede reducir el volumen de residuos contaminados y, en consecuencia los costes de gestión de residuos. Tecnologías para el tratamiento y eliminación de residuos no contaminados son relativamente simples y no muy costosos.
- Investigar más extensivamente el uso de equipos de control de sólidos y sistemas de manipulación de residuos para proporcionar un aumento en la capacidad de reducción, reciclaje y reutilización.

3.8 PLANEAMIENTO DE MANEJO DE RESIDUOS ACEITOSOS ⁽¹⁹⁾.

Los principios del manejo de residuos aceitosos incluye la incorporación de una jerarquía de las prácticas para el manejo de residuos en el desarrollo de los planes que se llevan a cabo para la disposición final del desecho. Prácticas específicas para el manejo de residuos que se pueden adaptar a las características de los residuos aceitosos y también al lugar de generación,

además como a la disponibilidad de reutilización, reciclaje, tratamiento y facilidades para la disposición final.

La creación de un inventario para rastrear, identificar los flujos de residuos, y registrar los costos asociados a la gestión de dichos flujos, puede ayudar a proporcionar una línea de base para la identificación de oportunidades para mejorar las prácticas.

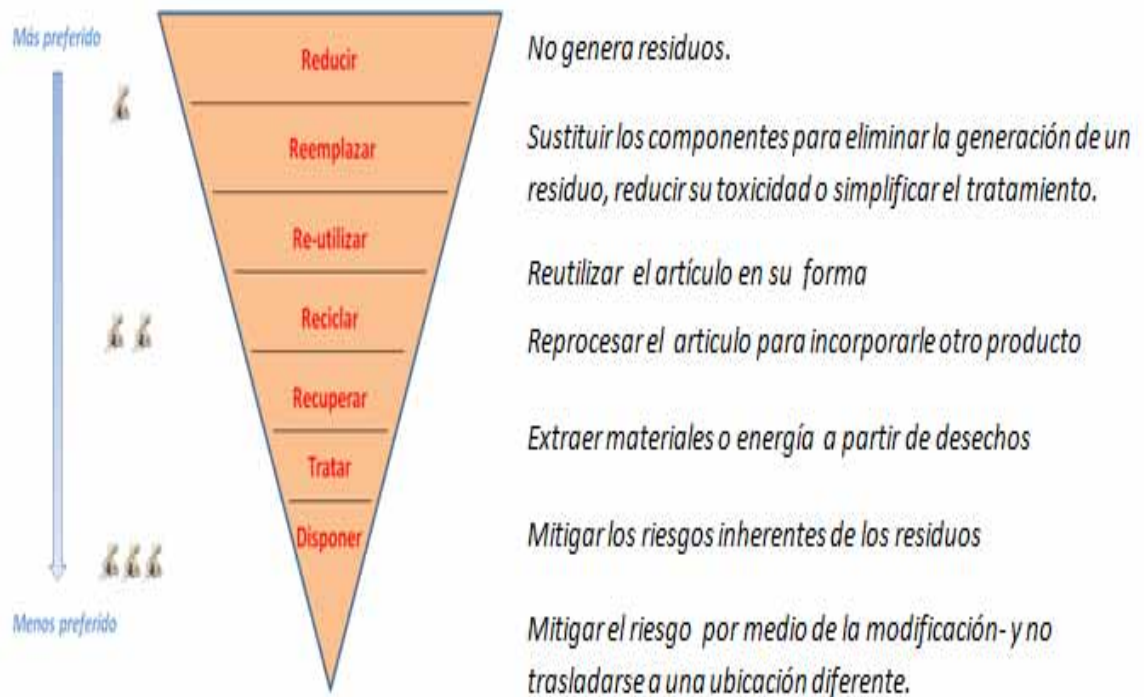
Tabla 5. Procedimiento para el manejo integral de residuos aceitosos.

ACTIVIDAD	QUE SE NECESITA PARA SER DESARROLLADO
Inventario de Residuos aceitosos.	Los residuos aceitosos que se esperan generar durante la construcción y puesta en marcha de las nuevas facilidades deben ser identificados, si es posible.
Evaluación del manejo de residuos aceitosos.	Se desarrolla un inventario de las instalaciones para el manejo de residuos operados por la compañía y por terceros.
Método preferido para el manejo de residuos aceitosos.	Cualquier tipo de residuo aceitoso identificado en el inventario, puede ser manejado por el método preferido.
Planeación/optimización del manejo de residuos aceitosos.	Identificadas las facilidades y los procesos para manejar de residuos aceitosos en los pasos anteriores se debe optimizar estas variables para que los procesos se den eficientemente teniendo en cuenta la disponibilidad de capital y superficie.
Plan del manejo de residuos aceitosos.	Los resultados obtenidos por los pasos anteriores deben ser documentados, para una posterior revisión del plan de manejo de residuos.
Tecnología estándar de las facilidades para el manejo de residuos aceitosos.	Construcción on-site de las facilidades para el manejo de residuos aceitosos.

Fuente: Autores.

El manejo adecuado de los residuos comienza con la prevención de la contaminación. Cuando se alude a la prevención de la contaminación se refiere a la modificación o reducción de las prácticas operativas que dan lugar a descargas en tierra, aire o agua. Este principio (disminución de la contaminación) se debe incorporar en el plan de diseño y manejo de las facilidades de superficie con el fin de mejorar las operaciones de E&P y la minimización de los residuos que causan efectos sobre el medio ambiente. El manejo responsable de residuos se puede lograr mediante la aplicación jerárquica de las prácticas de reducción en la fuente, la reutilización, reciclado, recuperación, tratamiento y la disposición final.

Figura 1. Esquema de la jerarquización del manejo de residuos aceitosos.

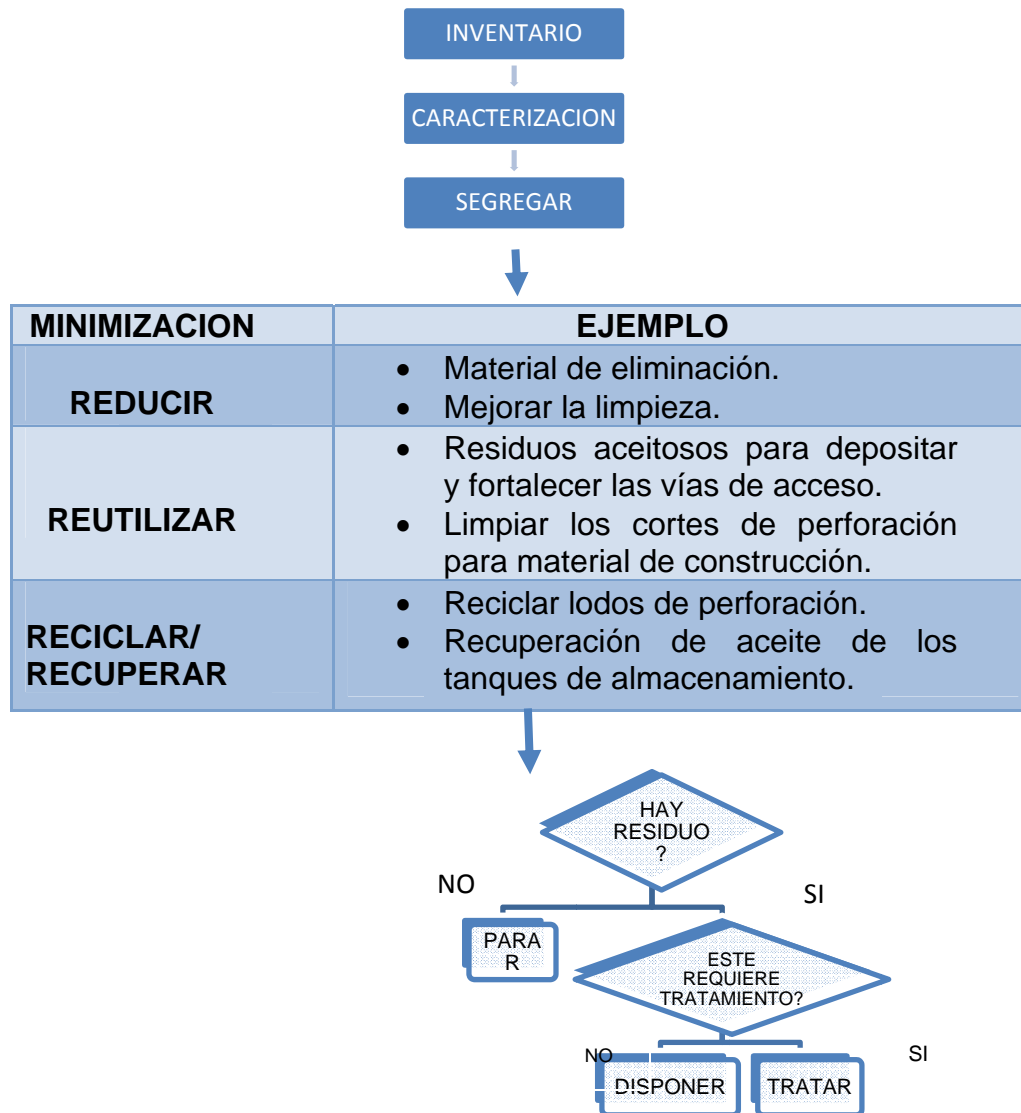


Fuente: SPE 111750. Waste Management Standards Enhance Environmental Performance. D.L. Conrad, R.E. Hoffmann, and S. McHugh, Chevron

Los programas para el manejo de residuos en el área de exploración y producción están diseñados para proteger la salud y disminuir el riesgo ambiental. Un manejo

eficiente de residuos puede resultar en reducir costos de operación. Como resultado de procesos técnicos de extracción de aceite y gas de la tierra, la industria produce y maneja grandes volúmenes de productos de desecho. El API estima que en 1985 tan solo en los Estados Unidos de América la industria del gas y del petróleo generaba 20.9 billones de barriles de agua de producción, 361 millones de barriles de desechos de perforación y 118 millones de barriles de residuos asociados

Figura 2. Diagrama de flujo de la planeación y tratamiento de los residuos aceitoso



Fuente: Autores

Las cuatro R's del manejo de residuos son: ⁽¹⁸⁾

- **Reducción en la fuente** es la generación de menos residuos a través de prácticas más eficientes tales como modificación de procesos, uso de aditivos no tóxicos, control de interventoría y Mejora en la limpieza.
- **Reciclar/Reutilizar** es el convertir el residuo a un producto utilizable tal como para la quema de residuo aceitoso para la generación de energía, residuos aceitosos para la construcción y estabilización de carreteras, reciclando lodos, chatarra metálica.
- **Recuperar** es la extracción de materiales o energía del residuo, tal como recuperar aceite del fondo de los tanques y lodos. Por ejemplo, en las operaciones de Conoco Indonesia, la recuperación fue el método principal para el manejo de grandes cantidades de lodos procedentes de tanques en Cilacap (Indonesia).

Estas cuatro R's son seguidas del tratamiento y la disposición. El tratamiento utiliza técnicas para minimizar la cantidad de residuo y su toxicidad para así minimizar la cantidad a ser eliminada. Para la eliminación de residuos, métodos ecológicamente racionales y aprobados deben ser utilizados.

Traslado de residuos ⁽¹⁹⁾. Durante las operaciones de limpieza, los residuos deben ser transportados. El transporte de estos dentro de cualquier área operativa requiere del uso de vehículos como camiones, cargadores frontales y vehículos todo terreno; para áreas de difícil acceso puede ser necesaria la implementación de helicópteros como medio para transportar el residuo.

El traslado de los residuos aceitosos que se lleva a cabo desde el lugar de recolección hasta el lugar de almacenamiento se lleva a cabo mediante vehículos como carro tanques para residuos líquidos y camiones sellados para residuos

sólidos. Es imperante que estos vehículos tengan un funcionamiento óptimo, sin ningún tipo de averías ni fugas con el fin de reducir la contaminación secundaria de carreteras y rutas de acceso, puesto que los residuos aceitosos transportados por estos son denominados residuos especiales por su alto nivel de toxicidad.

Tratamiento la destrucción, la desintoxicación y / o neutralización de residuos a través de procesos tales como:

- Métodos biológicos.
- Métodos térmicos-incineración, desorción térmica.
- Métodos químicos- neutralización, estabilización.
- Métodos físicos-filtración, centrifugación.

Eliminación responsable.

Depositar los residuos en tierra o agua con los métodos apropiados de cada situación. Los métodos de eliminación son:

- Enterramiento (Landfilling)
- Descarga en superficie
- Esparcimiento (Landspreading) o landfarming
- Inyección subterránea.

API sugiere 10 pasos para integrar los planes de manejo de residuos en las operaciones. ⁽¹⁸⁾

- **Paso 1: Aprobación del manejo de residuos.** Se debe obtener la aprobación y el apoyo de la gerencia para manejar los residuos. El personal clave empleado para la realización del plan de gestión debe ser consciente de la oportunidad y del alcance del plan de manejo donde se debe establecer un objetivo general, llegando a la consecución del mismo mediante el cumplimiento de objetivos específicos.
- **Paso 2: Definición del área.** El plan de manejo de residuos debe definir un área en la cual se debe especificar la descripción geográfica y las actividades dirigidas por el negocio. La consideración primordial en la selección de un área es la homogeneidad tanto desde el punto de vista ecológico y de reglamentación.
- **Paso 3: Identificación de residuos.** El personal de operaciones debe identificar todos los residuos generados dentro del área definida para cada actividad de E&P (producción, perforación, completamiento/reacondicionamiento de pozos (workover), plantas de gas natural). Se debe realizar un breve descripción para cada residuo (fuentes, y un volumen aproximado del porcentaje de aceite y/o contenido de agua salada) con el fin de proveer información más completa que ayudara al manejo del residuo.
- **Paso 4: Análisis de la reglamentación.** Se debe realizar una revisión de las leyes internacionales, regionales y del país de acogida para determinar el tipo de residuos y resaltar cuales son las prácticas apropiadas para manejarlo. También se debe identificar las regulaciones que no son adecuadas para el manejo de los diferentes tipos de residuos y deben ser requeridas en el plan de manejo.

- **Paso 5: Caracterización del residuo.** Deben ser identificadas las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de cada residuo. Esta información puede ser encontrada a través de datos para el manejo seguro de materiales (MSDS), también se puede obtener de la información proporcionada por los fabricantes, información histórica y análisis de laboratorio así como del conocimiento de los procesos. Así mismo se puede desarrollar un sistema para categorizar la afectación a la salud y al medio ambiente de acuerdo al volumen de residuo generado.

- **Paso 6: Evaluación para el manejo de residuos y opciones de disposición.** Se debe identificar y compilar en una lista para el manejo de residuos las opciones de los diferentes métodos de tratamiento y las opciones para disponerlos. Se debe determinar para cada opción disponible los diferentes aspectos ecológicos involucrados en el área.

La evaluación debe incluir: consideraciones ambientales; locación; limitaciones de ingeniería; restricciones de las regulaciones existentes, factibilidad operacional, disponibilidad económica; responsabilidad potencial a largo plazo; etc. La lista donde están compiladas las diferentes opciones de tratamiento del residuo y las aéreas específicas de generación y disposición deben ser revisadas por personal capacitado de operaciones y manejo de residuos.

En el caso de que existan residuos intratables como aquellos que contienen bifenilos policlorados y/o radiactividad debe someterse a la determinada identificación del residuo para proceder al correspondiente manejo de almacenamiento permanente y adecuar las facilidades para evitar así un riesgo mayor al ambiente.

- **Paso 7: Minimización del residuo.** Las oportunidades para la eliminación, la reducción del volumen y la toxicidad del residuo, así como el reciclaje y el

tratamiento para la recuperación del mismo deben ser incluidos, sometidos y evaluados en la revisión de opciones del manejo de residuos. Cuando una práctica de minimización de residuos potenciales es identificada, se puede realizar una prueba piloto para la evaluación y análisis de resultados. Las revisiones del plan de manejo de residuo se deben realizar para reflejar las prácticas de minimización y sus resultados.

- **Paso 8: Selección del método (práctica) preferido para el manejo de residuos.** De la evaluación del tratamiento y eliminación de residuos se puede seleccionar las mejores prácticas para la ubicación y operación. Un análisis del ciclo de vida para evaluar los riesgos asociados con el almacenamiento, tratamiento, transporte y eliminación de un flujo de residuos en particular puede proporcionar información adicional sobre las prácticas de manejo que se debe dar el estado preferido. A través de estos procesos, el personal de operaciones puede justificar algunas de las prácticas actuales de gestión de residuos y / o identificar las prácticas nuevas o modificadas

- **Paso 9: Implementación de un área para el plan de manejo de residuos.** Se debe compilar todos los manejos de residuos y las opciones para cada residuo encontrado en un área específica de funcionamiento.

Las prácticas recomendadas para el manejo de residuos debe ser un documento con un resumen completo para su uso. Las descripciones deben incluir solo los residuos generados por las operaciones en el área específica o dentro de la responsabilidad de un operador. Cada descripción de los residuos debe indicar el manejo dado al residuo y la práctica empleada para su eliminación.

- **Paso 10: Revisión y actualización del plan de manejo de residuos.** Un eficaz manejo de residuos es un proceso continuo. El plan debe ser revisado cada vez que las nuevas prácticas de manejo de residuos y otras opciones novedosas

son identificadas. Se debe establecer un proceso para la revisión y actualización del plan de manejo de residuos así mismo cuando se modifican las prácticas que reflejan la necesidad de cambios tecnológicos y/o del reglamento.

Además de estos 10 pasos sugeridos por API se recomiendan otros más para dar un mejor manejo de residuos E&P ⁽²⁰⁾

- Determine el tamaño de las fosas de manera apropiada para evitar desbordamientos.
- Use sistemas de lodo de circuito cerrado cuando sea práctico, en particular con lodos con base de petróleo.
- Repase las Hojas de Datos de Seguridad de Materiales (MSDS por sus siglas en inglés) de los materiales usados, y seleccione alternativas menos tóxicas cuando sea posible.
- Reduzca al mínimo la generación de residuos, diseñando diferentes sistemas con los menores volúmenes posibles (p.ej., los sistemas de lodos de perforación).
- Reduzca la cantidad de líquidos excesivos que ingresan a las fosas de reserva y de producción.
- Mantenga los residuos no exentos fuera de las fosas de reserva o producción.
- Diseñe la plataforma de perforación para contener aguas pluviales y lavado del pozo.

- Recicle y vuelva a usar los lodos con base de petróleo y las aguas saladas de alta densidad cuando sea práctico.
- Realice inspecciones y mantenimiento de rutina en el equipo para evitar escapes o emisiones.
- Recupere el escombros con petróleo y las sustancias en los fondos de los tanques cuando sea práctico.
- Reduzca al mínimo el volumen de materiales almacenados en las instalaciones.
- Construya banquetas adecuadas alrededor de las áreas de almacenamiento de materiales y de desperdicios para contener los derrames.
- Realice inspecciones de rutina en las áreas de almacenamiento de materiales y de residuos para identificar recipientes dañados o con fugas.
- Capacite al personal para que emplee prácticas sensatas de manejo de materiales.

3.9 BENEFICIOS ECONÓMICOS ⁽¹⁸⁾

La EPA desarrolló estimados de los costos de cumplimiento e impacto económico de la implementación de prácticas alternativas de manejo de residuos en la industria del gas y del petróleo mediante el modelamiento de tres escenarios de manejo de residuos: (a) “caso base” reflejando las prácticas actuales en manejo de residuos; (b) un escenario intermedio en el cual algunos controles estrictos en las prácticas de manejo de residuos son asumidos, y (c) un escenario “subtítulo c”

en el que todos los requisitos de la RCRA (Resource Conservation and Recovery Act)se deben cumplir.

El “caso base” representa las prácticas de disposición on-site en pozos revestidos o no revestidos para desechos de perforación, y, o la inyección en pozos profundos o disposición superficial del agua producida. Para el escenario del “subtítulo c” los desechos de perforación considerados peligrosos se disponen en instalaciones (por ejemplo facilidades revestidas sintéticamente con monitoreo y recolección de lixiviados, incineradores de residuos peligrosos), agua producida y peligrosos serían inyectados en pozos de inyección clase 1.

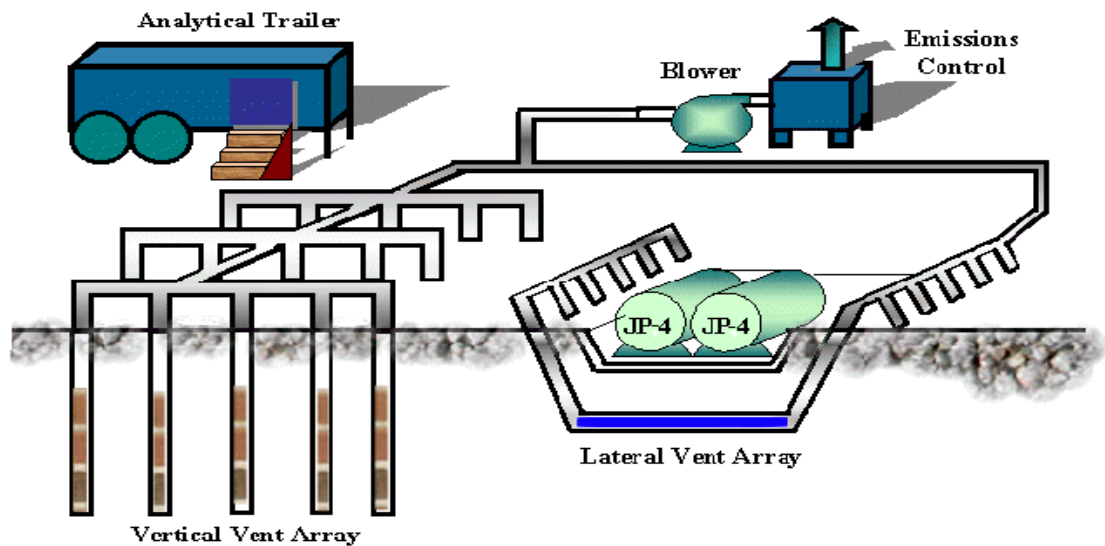
Los costos para disposición de residuos de perforación están en un rango de US\$ 2.04 por barril para disposición en hueco sin revestimiento a US\$ 157.50 por barril para incineración. Los costos para inyección de agua producida varía entre US\$ 0.10 por barril para disposición clase 2 y US\$ 0.92 por barril para disposición clase 1. Estos costos no incluyen los altos costos de capital para la instalación de dispersantes de petróleo y equipos de remoción de sólidos para cumplir con las especificaciones de calidad del agua de inyección. El peso y espacio requeridos para estos equipos de tratamiento de agua son muy altos. Esta es una seria preocupación especialmente en operaciones offshore, donde requerimientos de peso y espacio adicional pueden significar más costos de capital.

4. TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE RESIDUOS

4.1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN SITU ⁽²¹⁾.

4.1.1 Bioventeo

Figura 3. Esquema de un sistema típico de bioventeo.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-1.html>

En este proceso el oxígeno es llevado al suelo contaminado no saturado por el movimiento de aire forzado (ya sea extracción o inyección de aire) para aumentar las concentraciones de oxígeno y estimular la biodegradación.

El bioventeo es una tecnología nueva y prometedora que estimula la biodegradación natural in situ de compuestos degradables aeróbicamente en el suelo, proporcionando oxígeno a los microorganismos del suelo existentes. En contraste con la extracción al vacío de vapores del suelo, bioventeo utiliza las bajas tasas de flujo de aire para proporcionar sólo el oxígeno suficiente para mantener la actividad microbiana. El oxígeno es el elemento químico más comúnmente suministrado a través de inyección de aire para tratamiento de residuos en el suelo. Además de la degradación de los residuos de combustible, los compuestos volátiles se biodegradan en forma de vapores, que se mueven lentamente a través del suelo biológicamente activo. Bioventeo es una tecnología a largo plazo que varía desde algunos meses hasta varios años.

Aplicabilidad: Técnicas de bioventeo se han utilizado con éxito para remediar suelos contaminados por petróleo, solventes no clorados, algunos pesticidas, conservantes de la madera y otros productos químicos orgánicos. Mientras la biorremediación no puede degradar los contaminantes inorgánicos, la biorremediación se puede utilizar para cambiar el estado de valencia de sustancias inorgánicas y causar la adsorción, captación, acumulación y la concentración de sustancias inorgánicas en micro o macro-organismos.

Estas técnicas, en gran parte experimentales, muestran una considerable promesa para estabilizar o retirar productos inorgánicos del suelo.

Limitaciones: Algunos factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad del proceso son:

- Los vapores pueden acumularse en el basamento dentro del radio de influencia de los pozos de inyección de aire. Este problema puede aliviarse mediante la extracción de aire cerca de la estructura de interés.
- Muy bajo contenido de humedad del suelo puede limitar la biodegradación y la eficacia del bioventeo.
- Monitoreo de gases en superficie puede ser requerido.
- Las bajas temperaturas pueden retardar la remediación, a pesar de que se ha demostrado la remediación tiene éxito en climas extremadamente fríos.

Datos requeridos: Dos criterios básicos se deben cumplir para garantizar el éxito del bioventeo. Primero, el aire debe ser capaz de pasar a través del suelo en cantidades suficientes para mantener las condiciones aeróbicas. Segundo, los microorganismos naturales degradadores de hidrocarburos deben estar presentes

en concentraciones lo suficientemente grandes para obtener ratas razonables de biodegradación. Las pruebas iniciales se han diseñado para determinar tanto la permeabilidad del suelo al aire y las tasas de respiración in situ.

Las tasas de degradación de hidrocarburos casi siempre son estimadas a partir de las tasas de utilización de oxígeno mediante una simple relación estequiométrica con el supuesto de que toda pérdida de oxígeno se debe a la mineralización de los hidrocarburos por los microbios. Sin embargo, simples relaciones estequiométricas no se tienen en cuenta para la producción de biomasa y las reacciones de oxidación de inorgánicos. El oxígeno sirve como terminal receptora de electrones no sólo en la degradación de materia orgánica, sino también en la oxidación y la reducción de compuestos inorgánicos por microorganismos que obtienen energía mediante la oxidación química.

Comportamiento de los datos: El bioventeo es cada vez más común, y la mayoría de los componentes están disponibles. El bioventeo se muestra cada vez más y recibe una mayor aceptación por los consultores en el área de biorremediación. Como con todas las tecnologías biológicas, el tiempo para remediar un lugar utilizando bioventeo es altamente dependiente de especificaciones del suelo y propiedades químicas del medio contaminado.

Costos

Manejo de costos

- El área de superficie es el costo primario
- El impacto del número de pozos inyección/extracción que son instalados. El número de pozos instalados incrementa con el área de superficie.

- Tipos de suelo que contienen arena y grava producen significativamente bajos costos por la reducción en el número de pozos inyección/extracción a ser instalados

Análisis de costos: La siguiente tabla representa los costos estimados para aplicar bioventeo en sitios que varían en tamaño y complejidad.

Otros factores que afectan el costo de bioventeo incluyen el tipo de contaminante y su concentración, permeabilidad del suelo, número y espaciamiento de pozos. Tasa de bombeo, y tratamiento del gas de salida. Esta tecnología no requiere equipos costosos y solo algunas personas están involucradas en la operación y mantenimiento del sistema de bioventeo.

Tabla 6. Costos estimados por el tratamiento de residuos por Bioventeo. (Costo en dólares)

TECNOLOGIA DE SUELOS:		Bioventeo			
RELACION DE PARAMETROS	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	
	Pequeño		Grande		
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil	
\$/ft ³	\$26	\$27	\$2	\$3	
\$/m ³	\$928	\$970	\$79	\$109	

Fuente: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html

4.1.2 Biorremediación. Las operaciones llevadas a cabo en la industria petrolera generan materiales tóxicos y lesivos al medio ambiente, debido a esto el hombre en su sabiduría ha llevado a cabo procesos para mitigar, controlar y arreglar los medios contaminados, estos procesos tienen como fin la biorremediación, la cual hace referencia al uso de sistemas biológicos para acelerar el proceso natural de biodegradación. Los sistemas más utilizados son microorganismos y plantas.

Estas degradaciones ocurren en la naturaleza; sin embargo, la velocidad de estas es muy baja. Mediante una adecuada manipulación, sistemas biológicos pueden ser optimizados para aumentar la velocidad de cambio o degradación y así emplearlos en sitios altamente contaminados. En general las manipulaciones involucran producción e inmovilización de enzimas en determinados soportes y cambios genéticos a algunas cepas bacterianas.

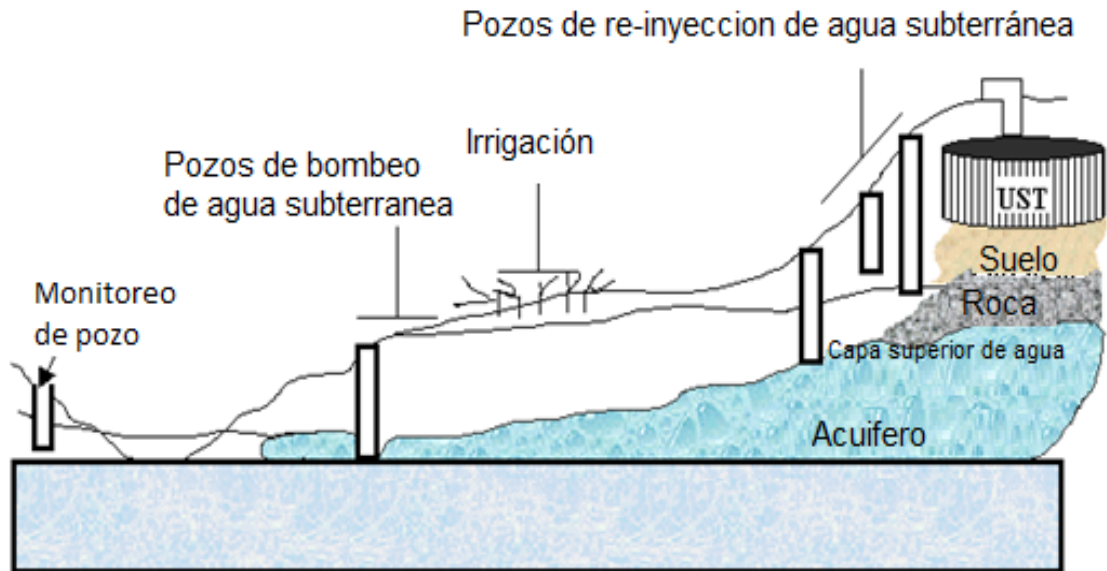
La biorremediación puede ser aplicada en dos técnicas:

- **Biorremediación in-situ** ⁽²²⁾: se intenta acelerar el proceso en el mismo ambiente modificando las condiciones ambientales o por inoculación microbiana, esta última se está convirtiendo en un método de aplicación masiva por su menor costo referente a otros métodos de limpieza. Se trata de acelerar los procesos naturales de degradación mediante el suministro de oxígeno y nutrientes durante cierto periodo.
- **Biorremediación ex situ** ⁽²²⁾: esta técnica consiste en extraer el contaminante y degradarlo en otro sitio en condiciones controladas de laboratorio.

Evidentemente este tipo de técnica genera un costo económico mayor, por lo cual muchas veces es sometida a evaluación para determinar su aplicación.

4.1.3 Biorremediación mejorada. La actividad de los microorganismos de origen natural se estimula mediante la circulación de soluciones a base de agua a través de los suelos contaminados para mejorar la degradación biológica in situ de los contaminantes orgánicos o inmovilización de los contaminantes inorgánicos. Nutrientes, oxígeno, u otras modificaciones se pueden utilizar para mejorar la biorremediación y desorción de contaminantes a partir de materiales del subsuelo.

Figura 4. Esquema general del proceso de biorremediación mejorada.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html>

La biorremediación mejorada es un proceso en el cual micro-organismos nativos o inoculados (ejemplo, hongos, bacterias, y otros microbios) degradan contaminantes orgánicos que se encuentran en el suelo y / o aguas subterráneas, a productos finales inocuos. Nutrientes, oxígeno, u otras modificaciones se pueden utilizar para mejorar la biorremediación y desorción de contaminantes a partir de materiales del subsuelo.

Ambiente aerobio. En la presencia de suficiente oxígeno, y otros nutrientes, los microorganismos en última instancia, convierten a muchos contaminantes orgánicos a dióxido de carbono, agua y masa celular microbiana.

La biorremediación Mejorada del suelo normalmente implica la filtración o la inyección de agua subterránea. El agua no contaminada se mezcla y satura con nutrientes y oxígeno disuelto. En ocasiones los microorganismos aclimatados (bioaugmentación) y / u otra fuente de oxígeno como el peróxido de hidrógeno

también se agregan. Una gama de infiltración o riego por aspersion se utiliza normalmente para suelos contaminados superficialmente y los pozos de inyección se utilizan para los suelos contaminados profundamente.

Aunque tuvo éxito en procesos de biorremediación in situ, se ha demostrado en el clima frío, que la baja temperatura retarda el proceso de remediación. Para sitios con bajas temperaturas del suelo, se utilizan mantas de calor para incrementar la temperatura del suelo e igualmente la rata de degradación.

La biorremediación Mejorada puede ser una tecnología de largo plazo en la cual se pueden tardar varios años para la limpieza de una región.

Ambiente Anaeróbico. En la ausencia de oxígeno, los contaminantes orgánicos se metabolizan en última instancia en metano, cantidades limitadas de dióxido de carbono y algunas trazas de gas de hidrógeno. Bajo condiciones sulfato-reductoras, el sulfato se convierte en sulfuro o azufre elemental, y bajo condiciones nitrato reductoras el gas nitrógeno es producido en últimas instancias. A veces, los contaminantes pueden ser degradados a los productos intermedios o finales que pueden ser menores a los iniciales, igualmente, más peligrosos que los originales.

Aplicabilidad: Las técnicas de biorremediación han sido utilizadas con éxito en la remediación de suelos, lodos, y aguas subterráneas contaminadas con petróleo, solventes, pesticidas y otros químicos orgánicos. Estudios a escala han demostrado la efectividad de la degradación microbiana anaeróbica de nitrotoluenos en suelos contaminados con diferentes residuos. La biorremediación es especialmente efectiva para la remediación de bajos niveles de residuos y conjuntamente con remoción en la fuente.

Los contaminantes tratados más a menudo son PAHs (Hidrocarburos Poli aromáticos), SVOCs (Componentes Orgánicos Semi-Volátiles) y BTEX (Bencenos, Toluenos, Etilenos y Xilenos). Por qué los dos grupos de contaminantes comúnmente tratados son SVOCs y PAHs, esto puede ser por la dificultad de tratarlos utilizando tecnologías que dependen de la volatilidad, tales como SVE (Extracción De Vapores del Suelo) Además, los tratamientos de biorremediación a menudo no requieren calor, relativamente requieren ingresos no muy costosos, como nutrientes, y usualmente no generan residuos que requirieran tratamiento adicional para disposición. Además cuando se lleva a cabo tratamientos in-situ estos no requieren excavación de contaminantes, comparado con otras tecnologías, tales como desorción térmica e incineración. Mientras la biorremediación no puede degradar contaminantes inorgánicos, la biorremediación puede ser utilizada para cambiar el estado de valencia de los inorgánicos y causar adsorción, inmovilización sobre partículas del suelo, precipitación, acumulación, y concentración de inorgánicos en micro o macro-organismos. Estas técnicas, aun son experimentales, son prometedoras para estabilizar y remover compuestos inorgánicos del suelo.

Limitaciones: Factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad de estos procesos incluye:

- Los objetivos de limpieza no pueden alcanzarse si la matriz del suelo impide el contacto entre contaminante-micro-organismo
- La circulación de agua a través del suelo puede incrementar la movilidad del contaminante y necesitar tratamiento para aguas subterráneas
- Alta concentración de metales pesados, largas cadenas de hidrocarburos, o sales inorgánicas pueden ser microorganismos tóxicos.

- La biorremediación es lenta a bajas temperaturas
- Concentraciones de peróxido de hidrógeno mayores a 100 o 200 ppm en aguas subterráneas inhibe la actividad de microorganismos.
- Sistemas de tratamiento en superficie, tales como air stripping o adsorción de carbón, pueden requerirse para tratar el agua extraída antes de re-inyección o disposición.

Muchos factores pueden ser controlados con buenas prácticas de ingeniería. El tiempo necesario para el tratamiento está entre 6 meses a 5 años y depende de muchos factores específicos del lugar a tratar.

Información Requerida: Las características importantes de los contaminantes deben ser identificadas para la factibilidad de utilizar biorremediación mejorada y observar el potencial de lixiviación, su reactividad química y lo más importante, su biodegradabilidad.

Características que se deben determinar incluyen la profundidad y el área de extensión contaminada; la concentración de los contaminantes, tipo de suelo y propiedades (ejemplo; contenido orgánico, textura, pH, permeabilidad, capacidad de retención de agua, contenido de humedad y nivel de nutrientes); competencia por oxígeno (ejemplo; potencial de redox); la presencia o ausencia de sustancias que son tóxicas para los microorganismos, y habilidad de los microorganismos en el suelo para degradar contaminantes.

Datos de rendimiento: La principal ventaja del proceso in situ es que permite que el suelo tratado no se excave ni transporte, resultando en menor perturbación en medio a tratar. Si la biorremediación mejorada puede llegar a la meta de limpieza en un periodo de tiempo compatible, contribuye a

ahorrar costos significativos en los métodos que implican la excavación y el transporte. También, tanto agua subterránea y suelos contaminados pueden ser tratados simultáneamente, proporcionando ventajas adicionales en costos. Procesos in-situ generalmente requieren largos periodos de tiempo, sin embargo, hay menos certeza sobre la uniformidad del tratamiento debido a la variabilidad inherente a las características del suelo, del acuífero y la dificultad en el seguimiento de los progresos.

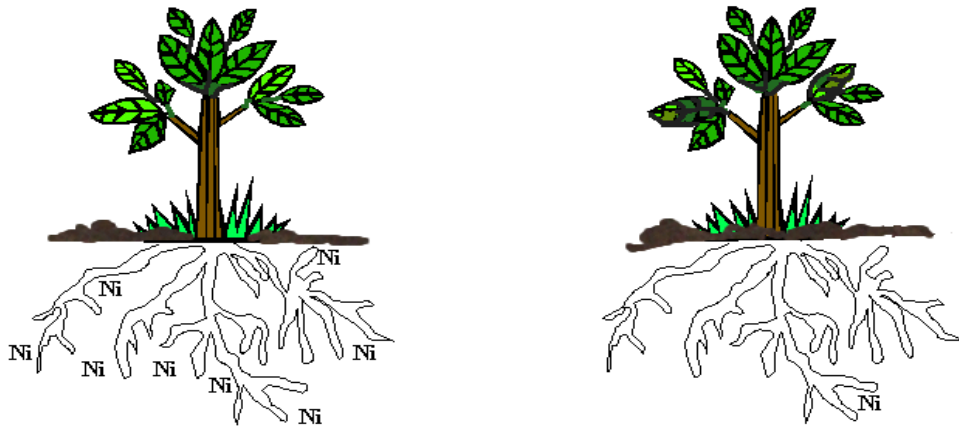
Los Tiempos de remediación tardan a menudo años, dependiendo principalmente de la rata de degradación específica de los contaminantes, características del sitio, clima. Menos de un año puede ser necesario para limpiar algunos contaminantes, pero componentes con alto peso molecular puede tomar mucho tiempo para degradar.

Existe el riesgo de aumentar la movilidad de los contaminantes y la lixiviación de estos en las aguas subterráneas. La biorremediación mejorada ha sido seleccionada para remediar y responder a acciones de emergencia en un número creciente de sitios contaminados. Generalmente los hidrocarburos de petróleo pueden ser fácilmente remediados, a un relativo bajo costo.

Costos: Los costos típicos para biorremediación mejorada están en el rango de US\$ 30 a US\$ 100 por metro cubico. Algunos de los Factores que afectan el costo pueden derivar de la química y el tipo de suelo, tipo y cantidad de aditamentos utilizados, y tipo y extensión de la contaminación.

4.1.4 Fitorremediación. Fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, y destruir contaminantes en el suelo. Los contaminantes pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos.

Figura 5. Asimilación y degradación de contaminantes por las raíces de la planta



Fuente: www.innovacionambiental.cl

Los mecanismos de fitorremediación incluye el mejoramiento de la biodegradación de la rizosfera, fito-extracción, fito-degradación y fitoestabilización.

Mejoramiento en la Biodegradación de la Rizosfera: El mejoramiento en la biodegradación de la rizosfera toma lugar inmediatamente alrededor de las raíces de las plantas. Sustancias naturales son liberadas de las plantas por sus raíces y sirven de nutrientes para los microorganismos, lo cual mejora la actividad biológica. Las raíces de las plantas se suavizan y luego mueren, siendo rutas de salida para el transporte de agua y para la aireación. Este proceso tiende a llevar agua a la superficie y secar las zonas bajas saturadas.

La flora más común en proyectos de fitorremediación son los Álamos. Principalmente porque estos árboles son de crecimiento rápido y puede sobrevivir en un amplia gama de climas. Además, los álamos pueden sacar grandes cantidades de agua (en relación con otras especies de plantas), ya que pasa a través del suelo o directamente de un acuífero. Esto puede sacar la mayor cantidad de contaminantes disueltos en medios contaminados y reducir la cantidad

de agua que puede pasar a través del suelo o de un acuífero. Reduciendo así la cantidad de contaminantes eliminados a través del suelo.

- **Fitoacumulación:** Fito-acumulación es la absorción de contaminantes por las raíces de la planta y acumulación de contaminantes en brotes de las plantas y las hojas.
- **Fitodegradación:** Fito-degradación es el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos vegetales. Las plantas producen enzimas, tales como dehalogenasa y oxigenasa, que ayuda a catalizar la degradación. Las investigaciones que se están llevando a cabo para determinar si los compuestos aromáticos y clorados alifáticos son susceptibles a la fito-degradación.
- **Fitoestabilización:** La fitoestabilización es el fenómeno de la producción de compuestos químicos por parte de la planta para inmovilizar los contaminantes de la interface de las raíces y el suelo.
- **Aplicabilidad de la fitorremediación:** La fitorremediación puede ser aplicada para la remediación de metales, pesticidas, solventes, explosivos, petróleo, PAHs (Hidrocarburos Poliaromáticos), y lixiviados de rellenos sanitarios.

Algunas especies de plantas tienen la habilidad de almacenar metales en sus raíces. Estas pueden ser trasplantadas a sitios para filtrar los metales de las aguas residuales. Como las raíces llegan a saturarse con los contaminantes metálicos, ellas pueden ser cosechadas.

La hiper-acumulación de plantas puede ser viable para remover y almacenar cantidades significantes de contaminantes metálicos.

Limitaciones: Las limitaciones de la fitorremediación incluyen:

- La profundidad de la zona de tratamiento es determinada por las plantas utilizadas para la fitorremediación. En la mayoría de los casos, esto se limita a suelos poco profundos.
- Altas concentraciones de materiales peligrosos pueden ser tóxicos para las plantas.
- La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de biodegradación no siempre se sabe.
- Los productos pueden mobilizarse a aguas subterráneas o bioacumularse en animales.
- Aún está en fase de demostración.

Datos requeridos: Además, información detallada es requerida para determinar la clase de suelos para utilizar proyectos de fitorremediación. Movimiento del agua, concentración de oxígeno reducido, crecimiento de las raíces, y la estructura de la raíz, influyen en el crecimiento de las plantas y se debe considerar en la aplicación de la fitorremediación.

Costos: Factores clave de los costos.

- Escala de esfuerzo
- El área de contaminación es el factor primario
- Densidad de muestreo

Análisis de costos: La siguiente tabla muestra los costos estimados (como una unidad de medida común), para aplicar fitorremediación en lugares que varían en tamaño y complejidad.

Tabla 7. Costos de remediación aplicando la Fitorremediación.

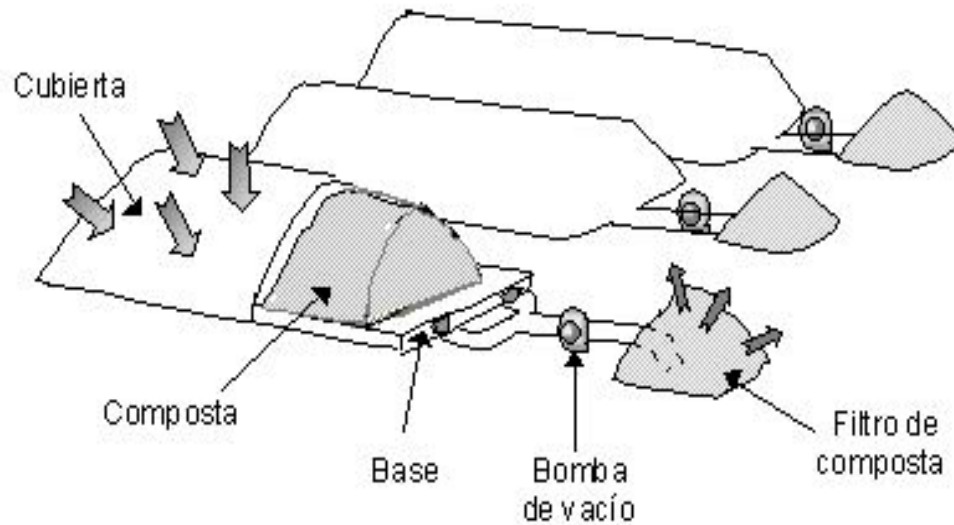
Tecnología de tratamiento:	Fitorremediación			
Relación de parámetros	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
	Pequeño		Grande	
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil
$\$/ft^2$	\$2	\$7	\$0.42	\$1
$\$/ft^3$	\$18	\$66	\$4	\$14
$\$/m^3$	\$626	\$2,322	\$147	\$483

Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html>

4.2 TRATAMIENTO BIOLÓGICO EX – SITU ⁽²³⁾.

4.2.1 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.

Figura 6. Esquema típico del sistema de biopilas



Fuente: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetitas/381/images/volke3.jpg>

Esta tecnología es empleada cuando la sustancia contaminante (residuos aceitosos líquidos) es demasiado volátil para ser tratado por la técnica de landfarming, ya que las emisiones gaseosas serían demasiado altas, y también es empleada cuando se desea acelerar el proceso de biorremediación, por medio del monitoreo y control de factores influyentes tales como el oxígeno y el pH.

La zona de tratamiento incluye sistemas de recolección de lixiviados y un sistema de aireación que cuenta con una serie de tuberías que son colocadas durante la construcción. Este sistema de tuberías está conectado a un soplador de presión negativa o de vacío, que fuerza al oxígeno presente en la atmósfera a pasar a través de la pila de suelo. También son controlables otros parámetros como la temperatura, el pH, los nutrientes y por su puesto la humedad. Existen en el mercado aditivos químicos específicos cuyas propiedades nutritivas pueden estimular el proceso de biorremediación. De esta manera se tiene un alto grado de control sobre el proceso y el medio.

La implementación de las biopilas como mecanismo de tratamiento y disposición final de residuos aceitosos es una tecnología que se puede caracterizar como de corto plazo, la duración de las operaciones y el mantenimiento del proceso se pueden llevar a cabo en pocas semanas o pocos meses.

Las acumulaciones de material en el suelo no deben ser superiores a los 3 metros de altura, puesto que estas pilas deben ser cubiertas por impermeables para controlar la volatilización de los compuestos orgánicos más volátiles, que posteriormente deberán ser tratados antes de su emisión a la atmósfera.

El tratamiento de los residuos aceitosos y los suelos contaminados por hidrocarburos se aplica fundamentalmente para la eliminación de hidrocarburos que tiende a desprender sus componentes de mayor volatilidad.

Los primeros pasos en la preparación de un diseño para el tratamiento biológico de suelos contaminados por hidrocarburos son:

- Caracterización del sitio.
- Muestreo y caracterización del suelo.
- Caracterización de contaminantes
- Estudios de tratabilidad de campo o laboratorio.
- Pruebas piloto y demostraciones sobre el terreno.

La caracterización del sitio, del suelo y de los residuos aceitosos contaminantes será utilizado para:

- Identificar y cuantificar el contaminante
- Determinar los requerimientos para la excavación
- Identificar los problemas de seguridad.
- Disposición de la maquinaria que realiza el tratamiento y manejo del residuo aceitoso.

Los estudios de laboratorio y tratabilidad del residuo aceitoso en el campo son necesarios para identificar:

- La proporción de nutrientes que promueven la actividad microbiana.
- El potencial de los subproductos tóxicos de la degradación.
- El porcentaje de reducción y el nivel más bajo de concentración de contaminantes posibles.
- La tasa de degradación.

Existen algunos factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad en el proceso que pueden ser:

- Se requiere la excavación de los suelos contaminados por el residuo aceitoso (hidrocarburo).
- los procesos de tratamiento estático pueden dar lugar a un trato menos uniforme que los procesos que involucran periodos de mezcla.

- Si no se realizan las pruebas de tratabilidad, no pueden determinarse las tasas adecuadas de biodegradabilidad del residuo aceitoso intervenido.

Los costos de empleo y desarrollo de este método de tratamiento depende del volumen y tipo de contaminante, como principal ventaja es que no necesita de muchos operadores para su realización, el costo típico de este tratamiento esta por el orden de US\$130 a US\$ 260 por metro cúbico.

4.2.3 Compostaje. El compostaje de suelos contaminados por residuos aceitosos es un proceso biológico controlado en el que los contaminantes orgánicos como los hidrocarburos halogenados policíclicos son convertidos en sustancias inofensivas por los microorganismos aerobios, dando lugar a un producto final estabilizado llamado compost, que es empleado eficazmente en la agricultura, como abono fertilizante.

El suelo contaminado es excavado y trasladado a la zona de tratamiento. Esta consiste en una pista impermeabilizada con ajuste de las pendientes hacia un sumidero para el control de los lixiviados, los cuales son reinyectados en el suelo, generando un ciclo semicerrado de circulación de agua.

Durante el proceso es necesario mantener unas determinadas condiciones para obtener unos buenos resultados:

- **Aireación:** Es un factor fundamental a controlar, ya que los microorganismos aerobios van a necesitar una tasa de oxígeno determinada para lograr la biodegradación de los contaminantes. Se puede conseguir una buena aireación de diferentes formas en función del tipo de proceso de compostaje diseñado.

- **Temperatura:** se generaran condiciones termófilas debido al calor producido por los microorganismos en la degradación del material orgánico. El rango de temperatura óptimo de trabajo oscila entre 54 °C y 65 °C.
- **Humedad:** los microorganismos necesitan de una hidratación adecuada para su correcto desarrollo. Una excesiva hidratación del suelo restringe el movimiento del aire en el subsuelo y reduce la disponibilidad de oxígeno, el cual es sumamente necesario para los procesos metabólicos aeróbicos de las bacterias. El rango ideal de hidratación del suelo es de 20 a 30% en peso.
- **pH:** las pilas de compostaje deben someterse en un rango de pH entre 6 y 8 para asegurar y mantener el crecimiento de la población bacteriana.
- **Nutrientes:** los microorganismos requieren de una fuente de carbono para el crecimiento celular, lo pueden obtener del contaminante (hidrocarburo) o puede ser adicionado como aditivo.
- **Cantidad de microorganismos.** Normalmente en la pila de suelo contaminado existen microorganismos suficientes para realizar el proceso, pero puede ser necesario inocularlos o añadir estiércol, esta adición garantiza el aumento de la población microbiana y la adición de nutrientes.

Existen tres diseños posibles del proceso de compostaje:

1. **Pilas estáticas aireadas.** El suelo se apila en montones que se airean mediante soplantes o bombas de vacío que están distribuidas en el interior de las pilas.
2. **Pilas mecánicamente agitadas.** El suelo se coloca en reactores donde se mezcla mecánicamente para conseguir la aireación.

3. **Ventana de compostaje.** Es la alternativa más rentable y la más utilizada. El suelo se coloca en montones alargados que se mezclan periódicamente con equipos móviles.

Los siguientes factores pueden limitar la efectividad del proceso:

- La disponibilidad espacial es necesaria para el método de tratamiento.
- La excavación del suelo contaminado es necesaria y puede causar la liberación incontrolada de compuestos orgánicos volátiles.
- Aumento del volumen de material a tratar por la adición de nuevas capas, para acelerar y ratificar el proceso de degradación.

Los costos de la implementación de este tratamiento de suelos que a su vez es un método para el tratamiento, descomposición y disposición final de material aceitoso dependen de la cantidad de material contaminante y principalmente del diseño empleado en el proceso.

Tabla 8. Costo derivado por el tratamiento de suelos por compostaje (costo en dólares)

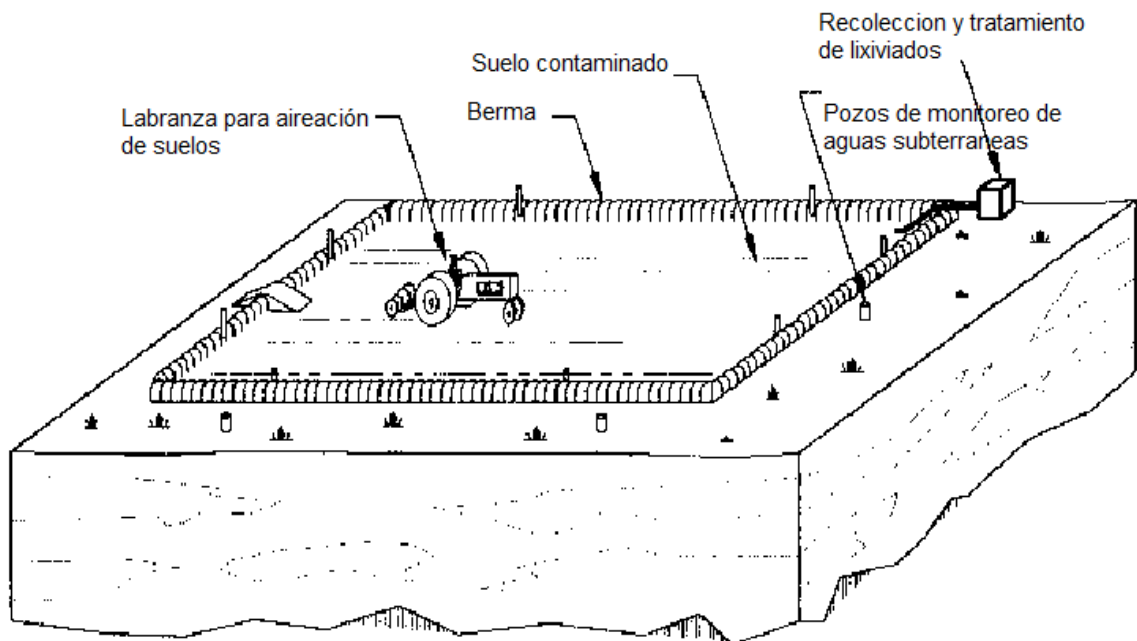
Tecnología de tratamiento:	Compostaje			
Parámetros	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
	Sitio pequeño		Sitio grande	
	Fácil	Difícil	Fácil	Difícil
Cada 3 ft ³ procesados	13,0	13,0	24,0	24,0
Costo de compostaje por m ³	\$259	\$345	\$249	\$321
Costo total por cada metro cubico	\$489	\$578	\$481	\$555
Costo por 1000 yardas cubicas	\$488,988	\$577,588	\$480,682	\$554,982

Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-4.html>

4.3.3 Landfarming. Esta tecnología consiste en extender el suelo contaminado sobre una geomembrana para evitar el escape de lixiviados, airearlo mediante volteo o arado para proporcionarles mecanismos y nutrientes. Se emplea para reducir niveles tóxicos en suelos altamente contaminados, la efectividad de estas metodologías depende de innumerables factores, entre ellos están las condiciones climáticas, las características agronómicas, topográficas y microbianas del suelo receptor, entre otras.

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

Figura 7. Esquema de tratamiento de suelos por landfarming



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-12.html>

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 aditamentos de cal en caso de aumentar la acidez.
- **Otras aditamentos:** nutrientes, inoculación de microorganismos.

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 montón 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 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

- Presentan cloro o nitrógeno.

Existen algunos factores que pueden limitar la efectividad de este método de tratamiento de residuos aceitosos y tratamiento de suelos y pueden ser:

- Se necesita una vasta extensión territorial, para la maquinaria e infraestructura empleada.
- Las condiciones como la temperatura incontrolada tienen efectos sobre la rata de degradación biológica, por consiguiente conlleva al aumento de la longitud del tiempo para una recuperación completa del terreno.
- Los componentes inorgánicos que posea el contaminante no podrían ser eliminados por la biodegradación.

El landfarming ha sido empleado en numerosas operaciones de gran escala, en particular en el tratamiento para los lodos empleados en las operaciones de perforación en la industria petrolera, logrando transformar el contaminante en sustancias sin ningún tipo de peligro.

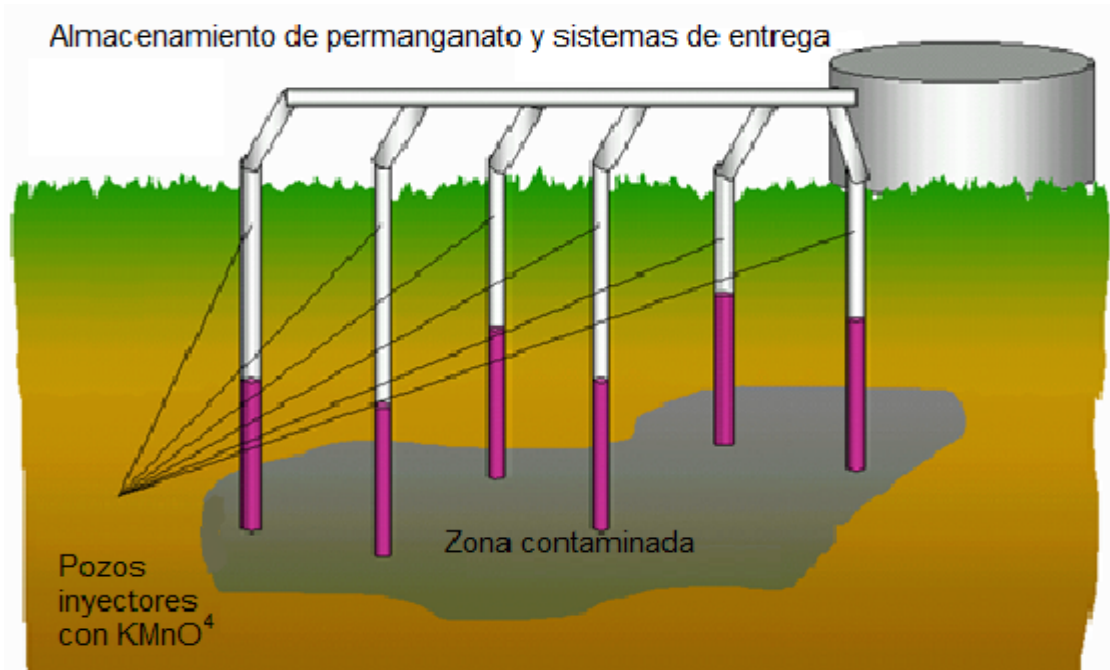
Los costos para este tratamiento pueden estar antes del tratamiento (independiente del volumen a tratar) y para estudios de laboratorio comprendiendo un rango entre \$25000 a \$50000 dólares y alrededor de US\$ 100000 dólares para pruebas piloto y/o demostraciones en campo.

4.4 TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO IN SITU ⁽²⁴⁾.

4.4.1 Oxidación química. La reducción química convierte los contaminantes peligrosos, en compuestos menos tóxicos, más estables, menos móviles y/o inertes que son fácilmente asimilables por el medio ambiente. Los agentes

oxidantes más utilizados son: el ozono, el peróxido de hidrógeno, cloro, el hipoclorito y el dióxido de cloro.

Figura 8. Sistema típico del proceso de oxidación química.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-30.html>

Los oxidantes químicos aplicados en la actualidad son el ozono, el peróxido y el permanganato, estos oxidantes han sido capaces de causar la destrucción química de una manera rápida y completa de muchos productos químicos inorgánicos tóxicos. En general los antioxidantes han sido capaz de lograr altas eficiencias de tratamiento (por ejemplo: más del 90%) para alifáticos insaturados (tricloroetileno) y los compuestos aromáticos (benceno) con velocidades de reacción muy rápidas alcanzando un 90% de destrucción en pocos minutos. Aplicaciones de campo han afirmado claramente que la preparación de los oxidantes y las condiciones de entrega in situ así como también la adecuación y condiciones del lugar son la clave para una implementación exitosa que conlleve al logro de los objetivos.

- Adición de ozono. El ozono puede oxidar los contaminantes directamente o a través de la formación en radicales de hidroxilo. Las reacciones causantes por el ozono han mostrado ser más eficaces en sistemas con pH ácido. Debido a la alta reactividad del ozono y a su inestabilidad se requiere que los puntos de entrega tengan un espaciamiento corto.
- Adición de peróxido. La oxidación con peróxido de hidrógeno líquido (H_2O_2) en la presencia de hierro ferroso nativo complementario (Fe^{+2}) produce un reactivo rico en hidroxilos. Estos oxidantes son fuertes, pero no específica que tan rápidamente puede degradar una gran variedad de compuestos orgánicos.
- Permanganato. La estequiometría de la reacción con permanganato (por lo general siempre como $KMnO_4$ líquido o sólido, pero también está disponible en Na, Ca, Mg, o sales) en los sistemas naturales es compleja. Debido a sus múltiples estados de valencia y a las formas minerales, el Mn puede interferir en numerosas reacciones químicas. En función de pH, la reacción puede incluir la destrucción por transferencia directa de electrones, estas reacciones de oxidación por permanganato son eficaces en un pH comprendido en un rango de 3,5 y 12.

Existen algunas limitantes para la aplicación y efectividad de un sistema de oxidación química como tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos y estos pueden ser:

- Las condiciones del suelo, como temperatura, pH, grado de penetración del contaminante en el suelo.
- Volumen de contaminante vertido en el suelo.
- Es muy peligrosa la manipulación de grandes cantidades de agentes químicos implementados en el tratamiento del suelo.

- Por supuesto el factor económico, se debe evaluar si hay otras maneras que sean más económicas y menos lesivas al ambiente.

4.4.2 Tratamiento electrocinético. Esta técnica es aplicable a la zona saturada del suelo y consiste en la aplicación de una corriente eléctrica de baja intensidad (que reduzca costes y respete a los organismos de la zona) entre dos electrodos cerámicos introducidos en la zona contaminada, para provocar la migración de las especies con carga. Los iones metálicos, iones de amonio y compuestos orgánicos cargados positivamente migrarán hacia el cátodo; mientras que los aniones cloruros, cianuros, fluoruros, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente lo harán hacia el ánodo. Alrededor del ánodo se generan condiciones ácidas, que pueden ayudar a movilizar los contaminantes metálicos para su transporte al sistema colector del cátodo. Si se va a aplicar a la zona no saturada, será necesaria una purga de agua.

Los dos mecanismos primarios de transporte de contaminantes son:

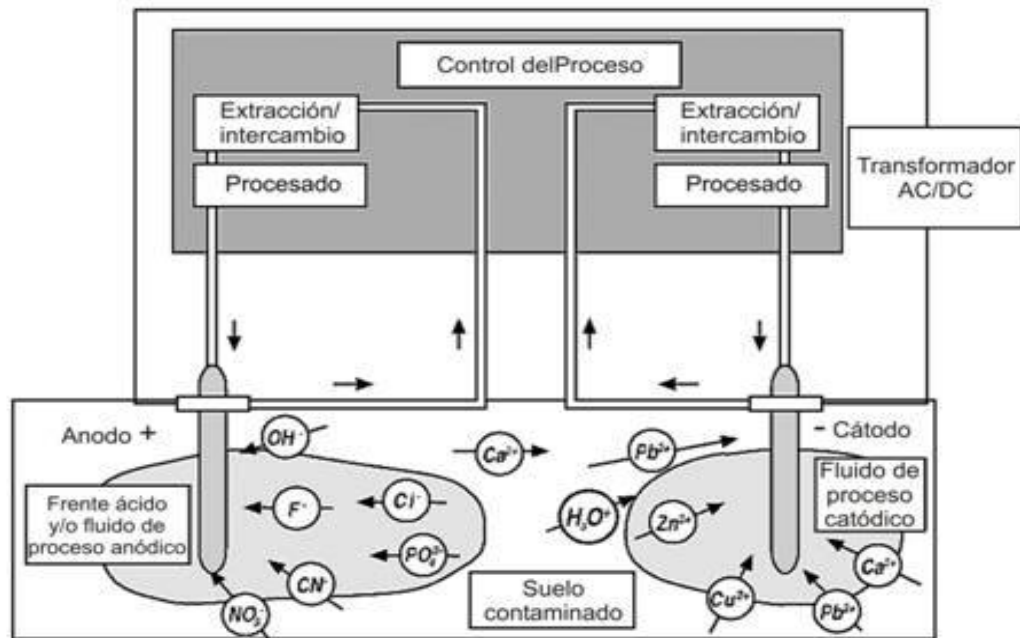
- **Electromigración:** Es la movilización de los contaminantes en forma iónica a favor del campo eléctrico. Representa el movimiento de las partículas en disolución en el agua intergranular del suelo o subsuelo, sobre la base de su comportamiento iónico.
- **Electroósmosis:** Representa el movimiento del líquido en relación a las cargas estacionarias de las superficies sólidas. Se produce una movilización en masa del líquido, como consecuencia de la interacción con las paredes de los poros. Se debe a que en las superficies no equilibradas de las partículas del suelo predominan las cargas negativas, que atraen al líquido hacia el ánodo, que se comporta como un gran catión. Las especies orgánicas o inorgánicas no iónicas pueden ser transportadas en este flujo de agua inducido.

Existen a su vez dos técnicas de eliminación de los contaminantes:

- **Extracción:** el mecanismo de transporte en este caso es la Electromigración, los contaminantes se van a concentrar en los electrodos polarizados para su extracción y posterior tratamiento ex-situ. La extracción en los electrodos se puede realizar de varias maneras entre las que destacan: galvanoplatear en el electrodo, precipitación o co-precipitación en el electrodo, bombeo del agua cercana al electrodo, o utilización de resinas de intercambio iónico. Esta técnica se usa en suelos contaminados con metales.
- **Tratamiento sin extracción:** el mecanismo de transporte que actúa es la electroósmosis, que se produce en las zonas de tratamiento colocadas entre ambos electrodos. La polaridad de los electrodos se invierte periódicamente para invertir el flujo de contaminantes a través de las zonas de tratamiento. La frecuencia con la que es invertida la polaridad se determina en función de la tasa de transporte de los contaminantes a través del suelo. Esta técnica se aplica en suelos con contaminados con compuestos orgánicos.

A continuación se muestra un esquema del proceso de tratamiento electrocinético:

Figura 9. Sistema de tratamiento electrocinético



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-4.html>

El procedimiento tiene la ventaja de que apenas si resulta influenciado por la textura o la permeabilidad del suelo, factores limitantes de otras técnicas, aunque como inconvenientes tiene el consumo energético elevado, que está limitado a la eliminación de metales y algunos compuestos orgánicos y que es posible una reducción en la eficacia del proceso por precipitación de sales y compuestos orgánicos.

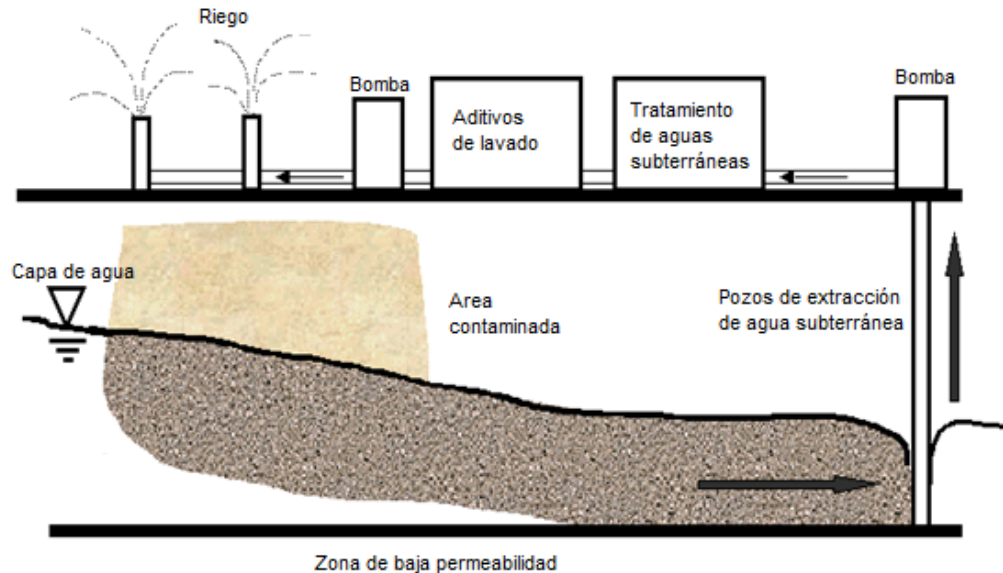
Estudios a escala piloto indican que los gastos de energía en la extracción de metales del suelo pueden ser de 500 kWh/m³ o más cuando hay un espaciado de electrodos entre 1 y 1,5 metros. Los costes variarán con la cantidad de suelo a tratar, con la conductividad del suelo, con el tipo de contaminante, con el espaciado de electrodos y con el tipo de diseño de proceso empleado.

Limitaciones:

- La eficacia es muy reducida para los desechos con un contenido de humedad inferior al 10%. La eficacia máxima se produce si el contenido de humedad está entre 14 y 18 por ciento.
- El tratamiento electrocinético es más eficaz en los suelos debido a la carga superficial negativa de las partículas de arcilla. Sin embargo la carga superficial de las arcillas se ve alterada por el pH del líquido en los poros y la adsorción de contaminantes. Extremos de pH en los electrodos y los cambios de las reacciones de óxido-reducción inducidas por el proceso de muchas reacciones inhiben la eficacia de la reacción electrocinética, aunque en condiciones de pH bajo puede ayudar a eliminar gran cantidad de metales presentes en la mezcla hidrocarburo suelo.
- La oxido-reducción puede causar la formación de productos indeseables como el gas y el cloro.

4.4.3 Lavado de suelos. El lavado del suelo in situ es la extracción de los contaminantes de la tierra con otras soluciones acuosas. El adecuado lavado de suelo se logra haciendo pasar el líquido de extracción a través de los suelos en el lugar de inyección o mediante un proceso de infiltración y la extracción del líquido es recuperada de un acuífero subyacente, y cuando sea posible esta debe reciclarse.

Figura 10. Proceso típico del lavado de suelos.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-6.html>

Mejoramiento del lavado de suelos por disolvente. El lavado con disolvente consiste en inyectar una mezcla de disolventes (e.g. agua más un solvente orgánico miscible como el alcohol) en zonas saturadas y no saturadas, con el fin de extraer los contaminantes orgánicos. El lavado con disolvente se puede aplicar a suelos para disolver la fuente de contaminación, o lo emanado por ella. La muestra con solvente se aplica normalmente cuesta arriba de la zona contaminada, y el solvente con contaminantes disueltos se extrae aguas abajo y se trata sobre el suelo.

El agua recuperada del suelo y los líquidos de lavado con contaminantes desorbidos pueden necesitar tratamiento antes de la descarga a los causes receptores o al sistema de agua residuales. La duración del lavado de suelo es generalmente característica a un ciclo de tiempo corto o de mediano plazo.

Limitaciones: Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y la efectividad del proceso incluyen:

- Baja permeabilidad o suelos heterogéneos son usualmente difícil de tratar.
- Los tenso-activos pueden adherirse al suelo y reducir la porosidad efectiva del suelo.
- Las reacciones de los líquidos de lavado con el suelo puede reducir la movilidad de los contaminantes.

Limitantes económicos.

- La permeabilidad del suelo es el principal causante del costo del tratamiento, los suelos con bajas permeabilidades son más recalcitrantes al lavado del suelo por lo tanto el tiempo de remediación puede ser significativamente mayor, por lo cual el aumento del costo es inminente.
- Las profundidades de las aguas subterráneas es otro aspecto de gasto económico, entre más profundas estén las corrientes de aguas es más costoso el tratamiento.

Análisis de costos.

Tabla 9: costos derivados por el lavado de suelos. (Costo en dólares)

Tecnología tratamiento:	Lavado de suelo			
	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
	Locación pequeña		Locación grande	
	fácil	Difícil	fácil	Difícil
Metro cubico procesada	1,388	1,388	5,550	5,550
Costo por m ³	\$32	\$49	\$18	\$27
Costo por cada 3 ft cúbicos procesados	\$32,320	\$48,729	\$18,420	\$26,853

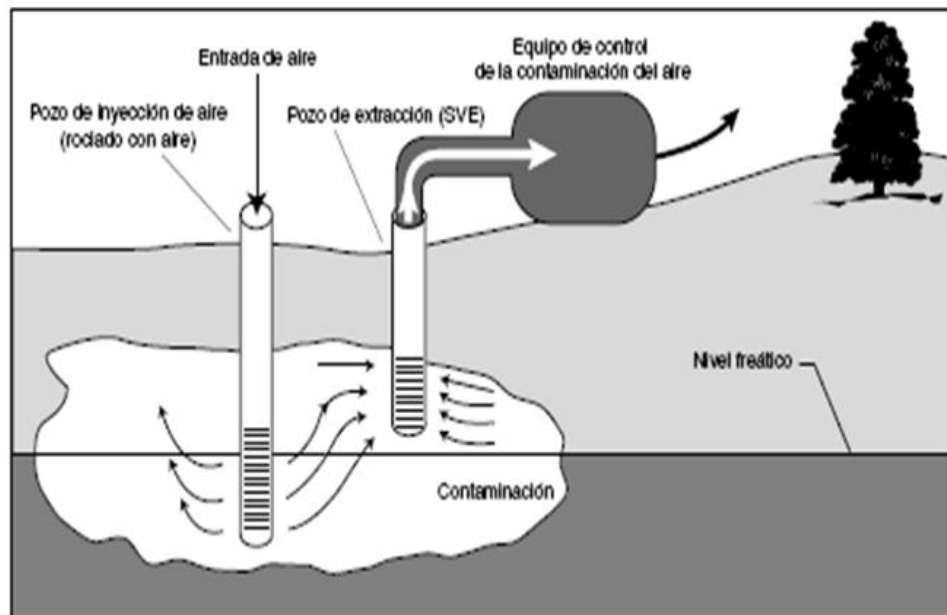
Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-6.html>

4.4.4 Extracción de vapor. La extracción de vapores es una técnica in situ que se aplica a la zona no saturada de suelo para la extracción de contaminantes volátiles

de tipo orgánico. Consiste en la perforación de pozos por encima del nivel freático, en los que se genera un vacío, de forma que se bombean los COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles) contenidos en el suelo.

Los pozos de extracción pueden combinarse con pozos de inyección de aire para favorecer la evaporación de los contaminantes. El número de pozos de inyección y de extracción para un área contaminada puede variar desde uno a cientos, en función de la extensión de la contaminación y las características del suelo. En el siguiente esquema se representa el proceso de extracción de vapores con la mejora de pozos de inyección de aire.

Figura 11. Esquema de extracción por vapor.



Fuente: <http://www.miliarium.com/prontuario/tratamientosuelos/ExtraccionVapores.htm>

Otras mejoras a la técnica básica que pueden ser utilizadas son las siguientes:

- Impermeabilizar la superficie mediante geomembrana que faciliten el flujo hacia los pozos y aumenten el radio de influencia de los mismos

- Instalación de respiraderos
- Inyección de aire caliente que aumente la temperatura y favorezca la volatilización de los compuestos orgánicos.

Los factores a tener en cuenta para comprobar las limitaciones de la técnica son:

- Volatilidad: cuanto mayor sea la volatilidad de los contaminantes más fácil serán extraídos.
- Grandes intervalos de detención son necesarios en los pozos de extracción con permeabilidades o estratificación muy variable.
- El suelo que tiene alto contenido orgánico o es extremadamente seco, tiene una alta capacidad de adsorción de compuestos orgánicos volátiles, y esto se traduce en la reducción de las tasas de extracción.
- El aire de escape en el sistema de SVE in situ puede requerir un tratamiento para eliminar los posibles daños a la población circundante y por supuesto al medio ambiente.
- La humedad es desfavorable, puesto que los compuestos orgánicos volátiles quedarán en el agua que hay en los poros al extraerlos y su tratamiento ex situ ya no puede ser el de una corriente gaseosa.

Por lo tanto, los contaminantes objetivos de extracción son los contaminantes orgánicos volátiles y algunos derivados del petróleo. La técnica no es aplicable para la eliminación de petróleo pesado, pero como el proceso implica flujo

continuo de aire por el suelo, esto a menudo promueve la biodegradación in situ de estos compuestos orgánicos de volatilidad baja.

Factores claves de costos.

- La cantidad de material a tratar, tiene un gran impacto en el tipo de suelo
- El número de pozos requeridos para la inyección de vapor.
- Puede ser radicalmente diferente si no se requiere el tratamiento del flujo de aire.

Tabla 10. Costos derivados de por la extracción de vapor. (Costo en dólares)

Tecnología:	Extracción de Vapor			
Parámetros	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
	Locación pequeña		Locación grande	
	fácil	Difícil	Fácil	Difícil
Costo por pie cubico	\$36	\$42	\$11	\$27
Costo por metro cubico	\$1,275	\$1,485	\$405	\$975
Costo por una yarda cubica procesada.	\$944	\$1,100	\$300	\$722

Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-7.html>

4.4.5 Solidificación/Estabilización. Con esta técnica se pretende conseguir reducir la solubilidad, reactividad o movilidad de los elementos contaminantes mediante modificación de su estado químico o inmovilización física por un agente estabilizante (estabilización); o bien convertir el residuo con el contaminante en un sólido de manipulación sencilla y seguir, evitando riesgos de volatilización, lixiviación o fugas (solidificación).

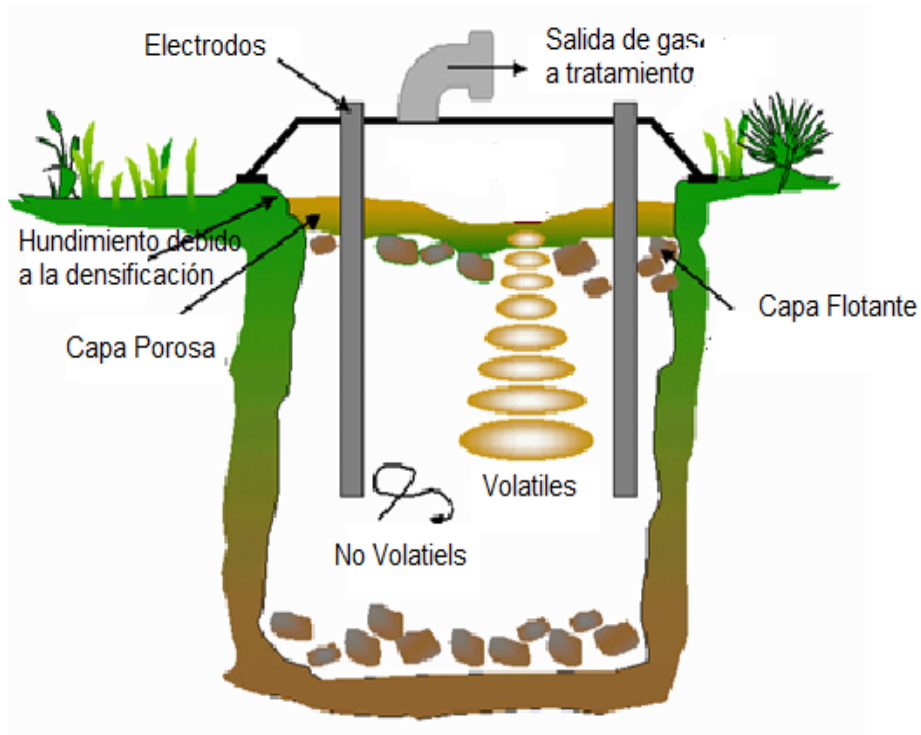
En general, estos métodos no van a destruir las sustancias contaminantes, sino que van a impedir su liberación o desprendimiento hacia el medio ambiente por procesos de lixiviación, reacciones químicas, etc.

- La vitrificación in situ, es otro proceso de estabilización/solidificación que utiliza corriente eléctrica para fundir el suelo y otros materiales inmersos en él a temperaturas extremadamente altas (1600 a 2000°C ó 2900 a 3650°F) y por lo tanto inmoviliza la mayoría de compuestos inorgánicos y por medio de la pirolisis destruye los componentes orgánicos. Los contaminantes inorgánicos son incorporados a la masa vítrea y cristalina, el vapor de agua y los productos orgánicos resultantes de la combustión por pirólisis son capturados en una campana, que atrae a los contaminantes a un sistema de tratamiento de gases que elimina las partículas contaminantes que lleva la corriente de gas.

Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y eficacia de los tratamientos de estabilización/solidificación in situ incluyen:

- La profundidad de los contaminantes pueden limitar la aplicación del proceso.
- Algunos procesos pueden tener como resultado un aumento significativo del volumen.
- Ciertos residuos son incompatibles con las variaciones de este proceso.
- Al igual que todos los tratamientos in situ, un muestreo de confirmación puede ser más difícil que para los tratamientos ex situ.
- La solidificación del material puede inhibir la utilización futura del lugar.

Figura 12. Esquema de una vitrificación in situ.



Fuente: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/D01-4-8b.html>

4.5 TRATAMIENTO TÉRMICO (IN SITU-EX SITU) ⁽²⁵⁾

4.5.1 Tratamiento térmico In situ

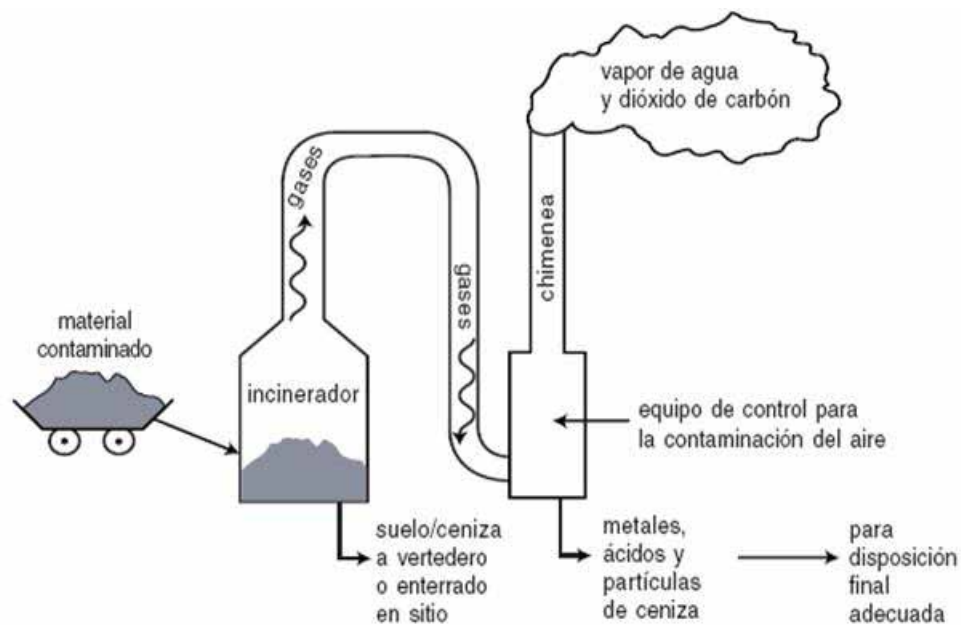
4.5.1.1 Incineración. El suelo se quema a temperaturas entre 870 y 1200 °C en presencia de oxígeno para volatilizar y, posteriormente, destruir por oxidación térmica, compuestos halogenados y otros compuestos orgánicos refractarios principalmente, mientras que los metales no son destruidos. A menudo es necesario combustible adicional para iniciar la oxidación.

No se trata de una incineración común, sino que se trata de superponer al efecto clásico de la incineración la posibilidad de hacer reaccionar en la fase gaseosa, a

elevadas temperaturas, el hidrógeno con los contaminantes orgánicos para producir moléculas más pequeñas y ligeras, y menos tóxicas.

El proceso se lleva a cabo in-situ, es decir, se excava el suelo y se lleva a los incineradores. Los gases residuales procedentes de la combustión generalmente requieren ser tratados para eliminar cualquier metal, ácido o partícula de ceniza remanente. Tales desechos son nocivos y deben desecharse en forma adecuada en un vertedero autorizado. Los otros gases más limpios, como el vapor de agua y el dióxido de carbón, se liberan al aire a través de una chimenea. El suelo o la ceniza remanente después de la incineración se pueden 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. A continuación se muestra un esquema del funcionamiento del proceso:

Figura 13. Tratamiento de suelos por incineración.



Fuente: <http://www.miliarium.com/prontuario/tratamientosuelos/Incineracion.htm>

Los tipos de incineradores más comúnmente empleados son:

- **Combustor de lecho circulante:** utiliza aire a alta velocidad para arrastrar la fuente alimento con los residuos y crear una zona de combustión sumamente turbulenta que destruya los hidrocarburos tóxicos. Esta turbulencia produce una temperatura uniforme alrededor de la cámara de combustión, de unos 760-870 °C, inferior a la de los incineradores convencionales. En el CBC se mezcla completamente el material durante la combustión. La mezcla eficaz y la temperatura de combustión baja reducen gastos de operación y las emisiones potenciales de gases como el óxido de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono (CO).
- **Lecho fluidizado:** utiliza aire a alta velocidad para difundir y suspender las partículas. Funciona a temperaturas mayores a 870 °C. Otras unidades experimentales, como la unidad infrarroja, usa una resistencia eléctrica para calentar elementos o tubos, que a su vez calientan el material que pasa por la cámara sobre una cinta transportadora y funciona en temperaturas similares (mayores a 870 °C).
- **Combustión infrarroja:** la tecnología de combustión infrarroja es un sistema de tratamiento térmico móvil que utiliza barras de carburo de silicio calentadas eléctricamente para elevar la temperatura de los compuestos orgánicos hasta la de combustión. Los residuos se alimentan a la cámara primaria sobre la cinta transportadora y son expuestos al calor infrarrojo radiante (1000 °C) proporcionado por las barras de carburo de silicio. Un soplante proporciona aire en determinados puntos del recorrido seleccionados con anterioridad para controlar la tasa de oxidación. Cualquier residuo que quede sin quemar es incinerado en un dispositivo de postcombustión.

- **Hornos rotatorios:** están equipados de un dispositivo de postcombustión y un sistema de control de la contaminación atmosférica. El horno rotatorio es un cilindro ligeramente inclinado que gira y que sirve como una cámara de combustión y funciona a temperaturas de más de 1000 °C.

La eficiencia de destrucción de residuos peligrosos está en torno al 99,99 %, elevándose a cifra hasta 99,9999 % para los PCB (Bifenilos Policlorados).

4.5.2 Tratamiento térmico ex situ

Desorción térmica. Es un tratamiento ex-situ que consiste en calentar el suelo a temperaturas intermedias (250-600 °C) para evaporar los compuestos orgánicos volátiles o los metales volátiles como el mercurio (Hg). Los gases contaminados que se generan se separan del aire limpio utilizando un equipo de recolección de gases. Los gases se convierten nuevamente en líquidos y/o materiales sólidos. Esos líquidos o sólidos contaminados se eliminan de manera segura. El polvo y las sustancias químicas dañinas se separan de los gases y se eliminan con seguridad y el suelo limpio se regresa a su lugar de origen, siendo previamente rociado de agua para controlar el polvo. El esquema del proceso se presenta a continuación

Figura 14. Esquema general del tratamiento de suelos por desorción térmica.



Fuente: <http://www.miliarium.com/prontuario/tratamientosuelos/DesorcionTermica.htm>

Los sistemas de desorción térmica varían en eficacia dentro del rango de los compuestos orgánicos:

- Los procesos que emplean una temperatura de aplicación más baja están indicados para la eliminación de COV (compuestos orgánicos volátiles) no halogenados y combustibles. Para otros COV la eficacia se reduce.
- Si la temperatura de desorción es moderadamente alta, la tecnología se aplica en la eliminación de compuestos orgánicos volátiles (SVOC), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB) y metales volátiles (como el Hg). Los COV y combustibles también pueden ser tratados, pero puede resultar menos rentable. La presencia de cloro puede afectar a la volatilización de algunos metales como el plomo (Pb).

El proceso es aplicable para la separación de compuestos orgánicos procedentes de residuos de refinería, residuos de alquitrán, residuos de la industria de la

madera, suelos contaminados por creosota, hidrocarburos, pesticidas y desechos de pintura

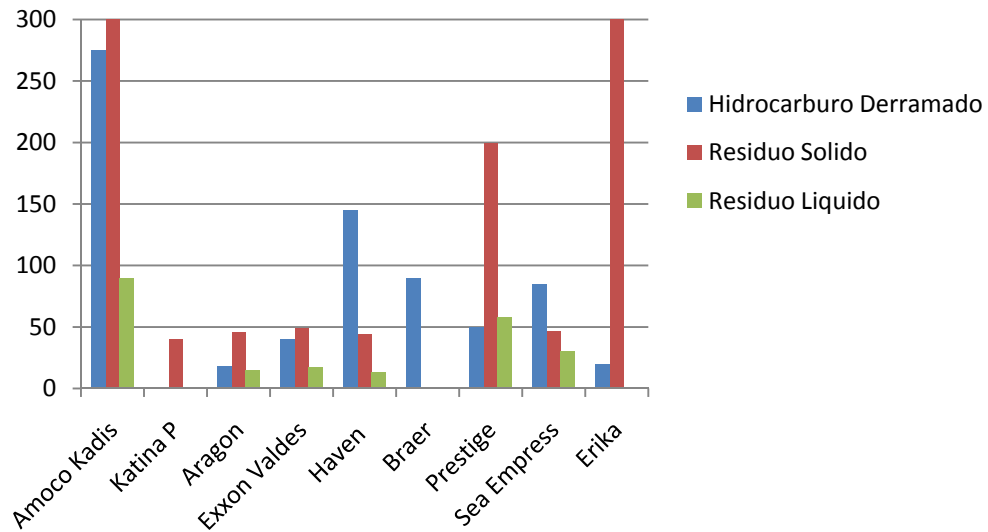
5. MINIMIZACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS DURANTE DERRAMES DE PETRÓLEO

5.1 ASPECTOS GENERALES

El transporte global de hidrocarburos desde los centros de producción hacia el mercado mundial se ha desarrollado por carretera, ferrocarril, ductos e infraestructuras marítimas. Como consecuencia de ello, existe un riesgo constante de derrames en casi cualquier entorno en el ámbito mundial.

La mayor parte del petróleo mundial se transporta, en alguna etapa, por mar, poniendo en riesgo de este modo el entorno marino. Aunque los derrames se pueden producir en mar abierto, la acción de las corrientes, de los vientos y de las mareas a menudo dará lugar a que el hidrocarburo derramado impacte las costas. Esto tiene muchas implicaciones, pero uno de los problemas más difíciles de tratar es la cantidad de residuos generados en un período de tiempo muy corto. Datos históricos muestran que los derrames de hidrocarburos que llegan a las costas pueden, en casos extremos, producir hasta 30 veces más residuos que el volumen del hidrocarburo derramado originalmente ⁽²⁶⁾

Figura 15 Relación entre hidrocarburo derramado y residuos generados



Fuente: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution. Guías Para La Minimización Y Manejo De Residuos Provenientes De Derrames De Hidrocarburos. Volumen doce, 24 p

Aunque puede haber diferentes razones para explicar la cantidad de residuos generados, también resulta evidente que un número significativo de derrames pequeños ha creado grandes cantidades de residuos. Deben considerarse el manejo de todos los residuos de cualquier derrame.

Cuando el petróleo por razones accidentales, operacionales, entre otras o inclusive voluntarias, como es el caso de Colombia con sus atentados terroristas a los oleoductos, es vertido al medio ambiente, origina lo que se denomina un Derrame de Crudo, definiéndose éste como una descarga violenta y no controlada de volumen de líquido de una manera imprevista, accidental y no deseada, la cual puede contaminar al medio ambiente (acuático o terrestre)

Una forma de clasificar los accidentes que ocurren en instalaciones petroleras es la siguiente: emisión, incendio y explosión, entre otros. Los derrames de petróleo

crudo pertenecen o hacen parte del grupo de emisión. También hace parte de este grupo los escapes de gases o vapores generalmente por imposibilidad de contención de los fluidos.

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS ASOCIADAS A RIESGO ⁽²⁷⁾

Las principales propiedades del aceite crudo que pueden provocar cierto riesgo sobre el ambiente son cinco.

a) Solubilidad: Los crudos de alto peso molecular son insolubles en agua. Los productos derivados del benceno y los naftalenos pueden solubilizarse en agua. Dicha solubilidad influirá en la toxicidad del componente de petróleo en el ámbito marino.

b) Volatilidad, densidad y actividad superficial: Indican las tendencias del crudo y de sus componentes a la evaporación, a hundirse o a dispersarse fácilmente o no. Los crudos con alto contenido de componentes livianos, se evaporarán más rápido que aquellos crudos pesados que contienen componentes con alto peso molecular.

c) Toxicidad: Los hidrocarburos aromáticos de bajo punto de ebullición son letales para casi todos los organismos terrestres y marinos. Algunos de los hidrocarburos parafínicos son menos tóxicos y hasta no tóxicos para los seres vivos.

d) Biodegradabilidad: La biodegradación del petróleo es función de sus características y peso molecular de sus componentes, por lo cual la tasa de degradación debe estudiarse y referirse al tipo de petróleo producido.

e) Carcinogenicidad: Varios componentes del petróleo tienen sustancias potencialmente carcinógenas. Una de ellas es el benceno, un cancerígeno grado 1

según la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer, IARC. La otra es el tolueno que produce mutación en las células vivas y puede afectar el desarrollo embrionario y fetal del ser humano.

5.3 CAUSAS QUE CONLLEVAN A DERRAMES DE CRUDO ⁽²⁷⁾

Existen numerosas causas que hace que el crudo sea vertido al ambiente. A continuación se cita algunas de ellas:

- Operaciones de carga y descarga de crudo en terminales. Perforación de pozos debido a posibles reventones.
- Arrastre por lluvias y cuerpos de agua.
- Trabajos en refinerías.
- Atentados a la infraestructura petrolera.
- Accidentes de superpetroleros.
- Accidentes de carro tanques que transportan crudo.
- Rebosamiento de tanques.
- Desastres ocasionados por fuerzas naturales como son el caso de terremotos, temblores, avalanchas, rayos, etc. que en oportunidades han causado daños a baterías de almacenamiento, tanques, tuberías y otros equipos causando eventos inesperados.
- Pequeñas fugas o escapes en recipientes que transportan o contienen crudo.

- La filtración natural del petróleo procedente de depósitos submarinos. Esta filtración resulta muy difícil de estimar.
- Fallas humanas. Por ejemplo en los grandes superpetroleros, seguida por problemas de infraestructura en equipos, materiales, etc.

A nivel de trabajo en campo petrolero las causas se pueden dividir en:

- Causas Operativas: Son las debidas a fallas en equipos de almacenamiento por sobrepresión de oleoductos, goteos en recipientes que contienen crudo, etc.
- Causas No Operativas: Son las debidas a fuerzas naturales como terremotos, sismos, rayos, inundaciones, etc. A esta división pertenecen los actos terroristas.

Por estudios estadísticos se puede estimar que la cifra global promedio de hidrocarburos que llega al mar cada año es de unos 3.200.000 (tres millones doscientos mil) toneladas métricas de unas 3000.000.000 (tres mil millones) de toneladas que se producen al año. Principales fuentes de hidrocarburos que contaminan el mar: ⁽²⁷⁾

- Fuentes naturales (brotes de petróleo al mar): 7%
- Exploración y Producción costa fuera: 2%
- Descargas industriales y drenaje urbano: 37%
- Atmósfera: 9%
- Accidentes de tanqueros: 12%

- Operaciones de embarque en terminales marítimas: 33%

5.4 COMPORTAMIENTO DEL CRUDO EN TIERRA ⁽²⁷⁾

Imagen (3) y (4) efectos del crudo en tierra



Fuente:<http://www.google.com/imgres?imgurl=http://www.asiescucuta.com/wp->



Fuente: VARGAS GALLEGO, Paola Andrea; CUÉLLAR, René Ricardo; Dussán, Jenny. Biorremediación de residuos del petróleo

El comportamiento del petróleo derramado en tierra depende de la topografía del terreno, de la evaporación, la permeabilidad del suelo, la vegetación y de las propiedades fisicoquímicas del petróleo como la densidad, viscosidad, etc. Algunos aspectos son de vital importancia para integrar un estudio detallado del comportamiento del crudo en tierra, entre ellos se tiene: Suelos, Vegetación,

Topografía, Clima, Hidrografía, Actividades Humanas, Uso de la Tierra, Características del petróleo y de las instalaciones petroleras, entre otras.

El comportamiento de un derrame de petróleo en tierra está gobernado principalmente por los siguientes procesos:

5.4.1 Evaporación. La evaporación es el proceso que determina los mayores cambios de volumen del petróleo durante un derrame, se estima que del total del petróleo derramado, entre un 30 % y un 50 % del volumen se pierde por evaporación.

El porcentaje del volumen de petróleo perdido por evaporación está en función de las propiedades físico-químicas de los componentes del aceite, la temperatura del ambiente y la duración del derrame.

El petróleo crudo está formado por miles de componentes diferentes, de los cuales la fracción más volátil se evapora rápidamente al inicio, seguida progresivamente por las fracciones menos volátiles.

5.4.2 Infiltración. En la medida que el petróleo derramado se distribuye horizontalmente sobre la superficie del terreno, parte del petróleo tiende a infiltrarse en el suelo por acción de la gravedad. El nivel de infiltración, depende de la permeabilidad y el contenido de agua en el suelo así como de las propiedades físicas del petróleo.

La infiltración de petróleo en el suelo es un proceso lento, se ha determinado que la infiltración del petróleo (crudo pesado) en las primeras 48 horas alcanza una profundidad máxima de 50 cm, o profundidades menores en el caso de encontrar estratos de suelos de texturas finas.

El volumen de petróleo retenido en el suelo (saturación residual) depende de la distribución y tamaño de las partículas del suelo.

5.4.3 Biodegradación. La biodegradación del petróleo depende de la aireación, fertilidad y acidez del suelo, la temperatura y la naturaleza de los componentes del petróleo. Después de un período de adaptación los microorganismos del suelo inician la degradación del aceite; para lo que requieren de oxígeno y otros elementos como nitrógeno y fósforo.

5.4.4 Adherencia superficial. Parte del petróleo derramado cesa su movimiento ya que se adhiere principalmente a la cobertura vegetal existente en el área del derrame. La proporción de petróleo adherido es función de la densidad de la cobertura vegetal, la topografía del terreno y de la viscosidad del crudo.

5.4.5 Distribución horizontal. Depende fundamentalmente de las condiciones topográficas presentes en la zona. El tiempo de flujo, la acumulación y las pérdidas de petróleo están relacionados con el suelo, la vegetación, el clima y las propiedades del petróleo. Cada uno de estos procesos está afectado por diversos factores como topografía, suelo, vegetación, clima, propiedades físico químicas del crudo, entre otros.

5.5 ALGUNAS CONSIDERACIONES EN EL MANEJO DE RESIDUOS PROVENIENTES DE DERRAMES ⁽²⁶⁾

5.5.1 “Status” de los residuos. Un modelo útil a la hora de tratar la corriente de residuos que se origina a partir de cualquier fuente es el ‘Status’ de los residuos’. Este concepto utiliza principios de reducción de residuos, de reutilización y de reciclado para minimizar la cantidad de residuos producidos, reduciendo de este modo los costos económicos y ambientales y garantizando el cumplimiento de los requisitos legales. Proporciona una herramienta para estructurar una estrategia de

manejo de los residuos y se puede utilizar como modelo para todas las operaciones

5.5.2 Segregación. En el caso de un derrame y de la subsiguiente operación de limpieza, el hidrocarburo y los desechos de hidrocarburos recogidos se convierten en residuos que deben segregarse, almacenarse, tratarse, reciclarse o disponerse. Suponiendo que haya disponibles alternativas de disposición segregada de los residuos, un proceso importante en las primeras etapas de la respuesta a un derrame es clasificar y segregar las corrientes de residuos directamente en la fuente. Los residuos deben distribuirse hacia un almacenamiento separado dependiendo del tipo de residuo, tomando en consideración el esquema de contención más apropiado para cada material.

5.5.3 Minimización. La minimización es un método de reducción de la cantidad de residuos que se introduce en la corriente de residuos. Esta actividad es esencial para reducir la cantidad de residuos que finalmente se dispondrán, limitando de este modo los impactos económicos y ambientales. Hay una serie de métodos para lograr este objetivo (ver ejemplos a continuación).

- Deben identificarse los potenciales sitios de impacto antes de que el hidrocarburo llegue a la costa. Estos sitios deben limpiarse de desechos y basura para reducir la cantidad final de residuos a tratar.
- Segregación en la fuente de los diferentes tipos de residuos contaminados (líquidos, sólidos, desechos, equipo de protección personal (EPP), etc.).
- En lo posible los sitios de contención deben tener una cubierta a prueba de agua para evitar la infiltración excesiva de agua de lluvia, que podría ocasionar el desbordamiento del contenedor de residuos y también dar lugar a agua contaminada adicional.

- El equipo de recolección debe limpiarse y reutilizarse en lugar de desecharse.
- La manipulación in situ de los residuos reduce la cantidad que requiere transporte y tratamiento posteriores. Los métodos incluyen lavado con el oleaje, quema controlada (si está permitido), tamizado de la arena y biorremediación.
- Debe utilizarse equipo de protección personal (EPP) reutilizable donde sea apropiado, por ejemplo, productos como botas de goma que pueden limpiarse y volverse a utilizar.
- Los productos absorbentes deben utilizarse con eficacia y moderación.

5.5.4 Contaminación secundaria. La contaminación secundaria es la propagación del hidrocarburo a través de la gente, el transporte y el equipo a áreas no contaminadas. Esto debe evitarse para controlar el impacto global del derrame, y puede lograrse de varias maneras. Por ejemplo:

- La designación de zonas 'limpias' y 'sucias' en el lugar de trabajo;
- La comprobación con regularidad de todas las bombas y conexiones en busca de fugas;
- Garantizar que todo el almacenamiento sea a prueba de agua y de hidrocarburos para evitar fugas;
- Descontaminar al personal y los equipos antes de dejar la zona de trabajo;
- Cubrir y descontaminar todos los vehículos dedicados al transporte de residuos antes de dejar el sitio de trabajo;

- establecer un esquema de circulación de vehículos

Imagen 5 contaminación secundaria



Fuente: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution. Guías Para La Minimización Y Manejo De Residuos Provenientes De Derrames De Hidrocarburos. Volumen doce, 24 p

5.6 DIFERENTES MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE HIDROCARBUROS Y SUS EFECTOS ⁽²⁶⁾

5.6.1 Técnicas de limpieza

5.6.1.1 Aplicación de dispersantes. Se utilizan productos químicos dispersantes para romper la capa de hidrocarburos en pequeñas gotas de tal manera que al diluirse en un medio acuoso se reduzcan las concentraciones de hidrocarburos. Esta técnica no es aplicable a todo tipo de hidrocarburos y puede ser perjudicial en cierto tipo de ambientes.

- **Efectos sobre los residuos:** la concentración de los residuos es mínima, debido a que el hidrocarburo queda suspendido en el medio acuoso para luego biodegradarse de manera natural.
- **Tipo de residuo generado:** no se genera ningún tipo de hidrocarburo, además de equipo de protección personal, y deben también considerarse los recipientes vacíos de dispersante.

5.6.1.2 Limpieza de derrames en tierra (On-Shore). Los hidrocarburos se recuperan de la tierra utilizando medios mecánicos, químicos, físicos o biológicos. La recuperación manual es la preferida por la minimización de residuos generados. Se utilizan máquinas para trasladar los residuos desde el sitio de derrame hacia el lugar de almacenamiento temporal. Se pueden utilizar tanques portátiles o piscinas impermeabilizadas. Para consolidar el hidrocarburo recuperado en el lugar de operación. El tipo de suelo y la capacidad de acceder a él, determinará el tipo de estrategia a utilizar, y al mismo tiempo, establecerá la cantidad de residuo recuperada.

- **Efectos sobre los residuos:** el tipo de hidrocarburo derramado a menudo tendrá un efecto profundo sobre la cantidad de residuos hidrocarburos generada. La segregación de residuos y las técnicas de minimización son extremadamente importantes para garantizar una limpieza efectiva. Estas técnicas deben establecerse en el sitio del derrame y mantenerse hasta el lugar de disposición final, si esto no se hiciera los residuos generados crecerán en un efecto de bola de nieve muy difícil de controlar.
- **Tipo de residuo generado:**
 - Equipo Impregnado

- Equipo de protección personal
- Hidrocarburo recuperado
- Agua contaminada
- Vegetación contaminada
- Absorbentes impregnados
- Cuerpos de animales muertos
- Material de tierra impregnado como arena, guijarros y piedra

5.7 BREVE CASO ⁽²⁶⁾

5.7.1 Estudio de caso Prestigie, España 2002. El buque petrolero Prestigie encalló en las costas del noroeste español en noviembre de 2002 derramando aproximadamente 63.000 toneladas de combustóleo. Se montó una operación de limpieza masiva con gran número de militares, voluntarios y contratistas especializados en cada uno de los sitios afectados. Se establecieron sistemas y se instruyó de manera preliminar a los trabajadores para que segregasen los residuos recogidos. Se proporcionó contención a prueba de hidrocarburos para cada uno de estos tipos de residuos pero, en última instancia, debido a las prisas y a las presiones operativas, los trabajadores mezclaron los residuos. El fracaso a la hora de implementar de manera rigurosa un plan exhaustivo de manejo de residuos significó que los residuos recogidos se depositaron conjuntamente en pozos impermeabilizados sin ninguna segregación para facilitar el reciclaje o la disposición final; el proceso de disposición final de estos residuos mezclados aún está en proceso, será costoso y exigirá mucho tiempo.

5.8 EQUIPOS DE RESPUESTA Y CONTROL A DERRAMES DE CRUDO ⁽²⁷⁾

La primera alternativa que se debe analizar es si se debe hacer una operación de respuesta al derrame o solo monitorear el crudo derramado para que por acción natural éste se disperse y se degrade sin intervención alguna por parte de las entidades involucradas en dicho vertimiento.

Por ejemplo, en zonas donde se expone la vida de los operarios, por presencia de grupos al margen de la ley donde no dejan operar, lo mejor es NO HACER NADA y así preservar el grupo personal de trabajo.

Básicamente las maneras o medios de dar respuesta a un derrame de crudo se dividen en:

- Mecánicos: A este grupo pertenecen los equipos tales como: bombas, skimmers, barreras de contención, sorbentes, etc.
- Químicos: En este grupo se incluyen los dispersantes y otras sustancias.
- Físicos: La quema in situ.
- Biológicos: Biorremediación y todos los que abarque la Biotecnología.

5.8.1 Principales equipos de respuesta a derrames de crudo

5.8.1.1 Mecánicos. La industria ofrece un mercado de diferentes componentes o accesorios para dar respuesta a los derrames de crudo.

5.8.1.1.1 Barreras de contención

Imagen (6), (7) y (8) barreras de contención



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

La mayoría de los crudos se extienden muy rápido por el agua, por eso es importante tratar de confinar de alguna manera este flujo. El medio más común de juntar el crudo derramado es por el de barreras. Existen diferentes diseños de estas de acuerdo al tipo de derrame y a otros factores que influyen para hacer uso de estos dispositivos como medio de control a los derrames de crudo. Las barreras permiten cercar derrames sobre la superficie del agua.

Se utilizan las barreras de contención para:

- Mantener el crudo en un lugar o área determinado.
- Dirigir el aceite hacia un punto determinado.

Básicamente se usan barreras cuando los derrames de crudo son muy grandes.

Tipos de Barreras: Existen muchos tipos de barreras. Entre ellos están: barreras de sorbentes, barreras flotantes, barreras improvisadas, etc. Los tipos de barreras más comunes que la industria ofrece son barreras mecánicas y barreras neumáticas (aire). El sistema más utilizado es la barrera mecánica. Cuando no se cuenta con suficiente tiempo para solicitar barreras, no existen barreras en depósito o el acceso al área de trabajo es muy difícil, hay que recurrir a las barreras improvisadas.

- **Barreras improvisadas:** Son las barreras que se hacen usando los materiales que estén alrededor, por ejemplo palos, materiales sorbentes, como plumas, paja, etc. Son muy útiles en ríos, quebradas, lagos, lagunas, etc.
- **Barreras de burbuja:** Estas barreras se producen cuando se bombea aire por una tubería perforada colocada por debajo de la superficie del agua. Las burbujas de aire crean una contracorriente en la superficie del agua que retiene el crudo contra un flujo de agua de hasta 0.7 nudos. A veces se instalan estas barreras para proteger los puertos donde las corrientes son relativamente bajas y donde las barreras flotantes estorbarían el paso de embarcaciones. Se debe tener cuidado que los orificios no se tapen con sedimentos u otros objetos u organismos marinos
- **Barreras sorbentes:** Este tipo de barrera es la que está construida por materiales que tiene la capacidad de absorber el petróleo derramado. Estas barreras pueden ser sacos rellenos de arena o paja u otro material. Son utilizadas para contener y recuperar petróleo en corrientes no tan fuertes como quebradas, pequeños riachuelos, etc. Tienen limitaciones de accesibilidad, no sirven para aguas profundas, el tiempo de implementación no es corto, las velocidades de las corrientes deben ser bajas. Su eficiencia disminuye al momento que se va saturando de líquido.

- Barreras mecánicas: Es un equipo mecánico o físico que se extiende sobre y por debajo de la superficie del agua, con la finalidad de contener, confinar y concentrar el petróleo derramado para su recolección, a fin de llevarlo a otras áreas o proteger áreas sensibles del impacto del petróleo. Entre las barreras mecánicas se tiene las barreras flotantes.
- Barreras flotantes: En el mar son muy utilizadas para cercar el vertido o dirigir la mancha de crudo hacia un sitio de recolección. Se presentan en tres versiones que difieren del diseño de sus flotadores. Estos pueden ser planos, cilíndricos o cilíndricos inflables.

5.8.1.1.2 Equipos o elementos recolectores (Skimmers)

Imagen (9), (10), (11) y(12) diferentes tipos de skimmers



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

Cuando el aceite derramado se encuentra confinado, lo ideal es recuperarlo de la superficie del agua. Tan pronto como sea posible, se despliegan barreras en el lugar afectado, se debe movilizar equipo y personal para tratar de aprovechar el

espesor de la capa, para evitar operar con petróleo degradado, y minimizar las posibles pérdidas de líquido que se originan por fallas en las barreras.

Un recolector puede ser definido como un equipo mecánico diseñado para remover el petróleo desde la superficie del agua sin causar mayores alteraciones en sus propiedades físicas o químicas.

La viscosidad del crudo derramado determina el tipo de skimmers a usar para que su recuperación sea de una gran efectividad.

En general, estos equipos pueden ser clasificados de acuerdo a sus principios básicos de operación en cinco categorías:

Recolectores de Vertedero

Este tipo de recolector aprovecha la fuerza de la gravedad que permite separar el petróleo del agua.

Recolectores de Succión: Estos equipos también trabajan en la superficie del agua, generalmente utilizan un sistema separado de bombas de vacío y están ajustados para flotar en la interfase agua/petróleo.

Recolectores Centrífugos: Este recolector está diseñado para operar por la formación de un remolino o vórtice de agua, que arrastra el petróleo hacia un área de recolección. Desde allí el petróleo pasa a un separador de agua / petróleo para su recuperación.

Recolectores Sumergidos: El petróleo que está en línea por donde avanza el recolector es llevado hacia debajo de la superficie por una correa que se mueve con un determinado ángulo de inclinación. Esta correa lleva el petróleo hacia abajo

hasta la boca de un depósito desde donde finalmente sube a la superficie por diferencia de densidades.

Recolectores de sorbentes superficiales (oleofílicos): Este tipo de recolector incorpora una superficie a la cual el petróleo se adhiere y de esta manera es posible removerlo desde el agua.

5.8.1.1.3 Bombas. En el mercado existen diversos tipos de bombas destinadas para la limpieza de zonas afectadas por derrames o para transporte de residuos, aquí algunas:

- Tipo LAMOR: son bombas sumergibles de desplazamiento positivo tipo tornillo de arquimedes-lamor GTA. Esta bomba es ideal para transferencia de petróleo de tanque a tanque, limpieza de fosas, recolección rápida en emergencias, petróleos emulsificados, limpieza de tanques para mantenimiento, mantenimiento de tuberías o cuando la temperatura del ambiente hace más viscoso el petróleo. Estas bombas son las más modernas y poderosas en el mercado para mover petróleos viscosos, de hasta 3.000.000 centistokes. También existen bombas neumáticas de vacío, de presión, autocebantes, de caudal y de desplazamiento positivo, entre otras.

Imagen 13 bomba tipo Lamor



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

- Tipo SELLWOOD: Bombas de desplazamiento positivo con la capacidad de cebado automático y funcionamiento indefinido en seco. Equipos especialmente diseñados para manejo de aceites, lodos y productos de la industria del petróleo.

Imagen 14 bomba tipo sellwood



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

- Tipo SELLWOOD HS RANGE: el sistema hidráulico puede funcionar con aceite sintético biodegradable o vegetal, lo que reduce significativamente la polución dañina para el medio ambiente. Este sistema hidráulico incorpora un gran filtro de retorno que asegura la captura de cualquier contaminante y un dispositivo de drenaje lo cual permite proporcionar una capacidad de funcionamiento durante 24 horas.

Imagen 15 bomba tipo sellwood hs range



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

- Tipo SELLWOOD CHOPPER: bombas especialmente diseñadas para manipulación de sólidos. Estos equipos son ensamblados con motores eléctricos de alta eficiencia con potencia desde los 7.5 kw hasta los 15 kw. Las bombas Chopper alcanzan a manejar caudales hasta de 300 m³/h con presiones de 36 psi. Estos equipos vienen con 6" de succión y 4" de descarga y la construcción es en

fundición de hierro gris ASTM A48 CL 30 a excepción del impulsor el cual es fabricado en una aleación de alta dureza (60 Rockwell).

Imagen 16 bomba tipo sellwood chopper



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

5.8.1.2 Químicos. Existen diferentes sustancias químicas que ayudan a minimizar o controlar los derrames de crudo. Entre ellas se tiene a las siguientes: agentes de hundimiento, agentes gelatinosos, detergentes, dispersantes, etc. A continuación se hace énfasis en el uso de dispersantes pues es uno de los más desarrollados y usados en estos casos.

5.8.1.2.1 Uso de dispersantes. Básicamente un dispersante es un agente de superficie activa cuya estructura molecular tiene afinidad por el crudo (oleófila) y otra que tiene afinidad por el agua (hidrófila). Cuando se aplica a una mancha y se mezcla con ésta, las moléculas se arreglan en la interfase aceite / agua de tal manera que se reduce la tensión interfacial entre estas sustancias, ayudando a la

formación de pequeñas gotas de aceite dispersado con un área superficial combinada mayor que la mancha de aceite inicial.

Existen otro tipo de productos en el mercado que se utilizan para hacer un trabajo más ecoamigable, y ofrece ventajas para el manejo final de los residuos generados en estas operaciones.

- **Absorbentes 100% biodegradables:** El absorbente es un producto encapsulador y solidificador 100% orgánico y oleofílico, no tóxico, no abrasivo e hidrofóbico. Cualquier derrame o residuo aceitoso una vez encapsulado tendrá la apariencia de un material seco al contacto eliminando las posibilidades de “leaching” y disminuyendo de esta forma los costos de limpieza y tratamiento de residuos. Por ser 100% orgánico su disposición será segura en pistas de remediación o en procesos de incineración (reduciendo su volumen a menos de 2% de cenizas).

Aplicaciones: - derrames en cuerpos de agua – derrames en tierra- tratamientos de remediación de residuos aceitosos – manejo de derrames en bodegas de almacenamiento, talleres de almacenamiento- respuesta de emergencia en derrames

Imagen 17 absorbentes biodegradables



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

- **Rompedor de hidrocarburos y desgrasantes:** Son una solución para problemas específicos de contaminación por hidrocarburos, importante en los procesos de limpieza industrial, recuperación de suelos contaminados, mitigación de atmosferas explosivas y aseo dérmico. Formulado a partir de productos cítricos orgánicos, neutraliza gran variedad de contaminantes y logra estabilizar metales pesados. Características: no tóxico, no inflamable, no contiene productos derivados del petróleo, seguro para usar cerca a personas, animales, productos alimenticios y plantas, convierte hidrocarburos y otros contaminantes en una solución acuosa segura para ser vertida en el sistema de alcantarillado. Frente a agentes emulsificantes, de tensión superficial y detergentes los rompedores de hidrocarburos y desengrasantes trabajan a nivel molecular, transformando los contaminantes en estructuras no dañinas

Imagen (18) aplicación de rompedores de hidrocarburos



Fuente: <http://www.varichem.com/equipment.html>

5.9 PAUTAS PARA EL CONTROL DE DERRAMES EN TIERRA ⁽²⁷⁾

Para controlar un derrame en tierra, se debe en lo posible detener el esparcimiento del crudo vertido por medio de barreras de contención y tratar de confinarlo en un lugar adecuado para posteriormente recolectarlo.

Los equipos más usados para este fin son:

- Maquinaria pesada para remoción de tierra.
- Materiales para ser usados como represas.
- Bombas, tanques de almacenamiento, camiones de vacío, etc.

- Materiales absorbentes naturales y artificiales.

La contención se debe hacer usando maquinaria pesada para remover tierra adyacente y hacer represas, o usando ramas, tablas, palos u otros materiales para su posterior recolección.

Dependiendo del tipo de sustrato se procede de la siguiente manera:

Para sustratos impermeables se debe bloquear entradas a sistemas de drenajes, sistemas de alcantarillados y ductos con el fin de evitar explosiones o contaminación de plantas de acueductos o de riego.

Para los sustratos permeables la acción a tomar es evitar la penetración profunda del crudo.

Se debe hacer lo siguiente:

- Incrementar el esparcimiento del crudo en la superficie para evitar que éste se profundice en sitios sobresaturados. El resultado será más material contaminado a tratar, pero es preferible a que el subsuelo o aguas subterráneas terminen contaminadas ya que los trabajos de descontaminación serán más arduos.
- En lo posible aumentar la eficiencia de operación de los materiales absorbentes como por ejemplo; paja, aserrín u otros absorbentes.
- Bombear las lagunas o charcos de crudo libre tan rápido como sea posible.
- Mover con bulldozer el aceite libre y el suelo saturado de crudo hacia una superficie contigua o impermeable ya sea natural o artificial.

Intercepción de derrames con zanjas

Lo que se pretende es interceptar el movimiento del crudo derramado en el subsuelo, por medio de zanjas construidas a través de la trayectoria de migración.

Los materiales usados para este fin son:

- Excavadoras y equipo manual
- Material de soporte (tablones de madera, miembros para refuerzo, etc.
- Bombas de agua.

La zanja es construida por una excavadora mecánica. Dependiendo de la profundidad de la zanja se colocan soportes a los lados, preferiblemente entablado vertical o recubrimiento de las paredes con material impermeable, para evitar que el crudo contamine áreas vecinas.

Estas zanjas pueden ser construidas si el nivel freático está situado a menos de 3 metros por debajo de la superficie del terreno.

Otra opción es recoger el material contaminado y revolverlo con lodos de perforación que han sido usados y hacer luego el proceso de biorremediación.

6. SITUACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El Área de Manejo Integral de Residuos AMIR se construyó en un predio de 8 hectáreas el cual cuenta con tres terrazas (una de aprox. 120 por 70 m, otra 40 por 50 m y la última de 30 por 50 m), está ubicado en la vereda el Quemadero del corregimiento El Centro en el municipio Barrancabermeja, Santander, con sus respectivas vías de acceso y luz perimetral, está conformada por cuatro zonas según el tipo de residuo a tratar.

Cronológicamente el proceso se inició con una propuesta para la recuperación de salmuera en el 2007, realizada por el ingeniero **Neder Rodríguez Quijano** e implementada con el apoyo de la compañía OCCIDENTAL ANDINA, a raíz del éxito con este proceso se propuso la recuperación de los lodos y aguas de perforación (2008) y por último se integró al grupo la Ingeniera **Vanessa Cardona Nigrinis**, para realizar la propuesta de un esquema de tratamiento de emulsiones, sólidos y demás residuos aceitosos de las facilidades de la operación (2009).

El AMIR no solo concentra en un solo sitio el manejo de todos los residuos (sólidos o líquidos) que se generan y manejan en varios sitios dispersos dentro del campo, sino que esencialmente es construida con estándares ambientales aceptables y ha sido **diseñada para operar bajo el concepto de convertir los residuos en productos aprovechables** mediante sistemas de tratamiento que permitan asegurar cada uno de los procesos realizados.

El esquema de tratamiento aplica tecnologías con el fin de recuperar el mayor porcentaje de los componentes de los residuos para ser re-utilizados en nuevas operaciones de las actividades de Perforación, reacondicionamiento a pozos y Producción o para ser comercializados.

6.1 OBJETIVO DEL PROYECTO AMIR

Establecer el esquema de tratamiento integral implementado en el proyecto LCI, para los residuos industriales de perforación relacionados con el lodo base agua y aceitosos generados por la operación de los campos petroleros que permita recuperar lodos de perforación, crudo, salmueras y aguas. Además proponer un método de biorremediación para los residuos con menor contenido de hidrocarburo que incluya disposición final y que garantice la reducción del residuo y el riesgo de contaminación al medio ambiente.

6.2 ALCANCE

Tratamiento de todos los residuos relacionados con los lodos de perforación base agua y los residuos impregnados con hidrocarburos provenientes de la operación, equipos de subsuelo y facilidades de producción, el transporte de los productos, cuando se requiera y disposición final de los residuos generados en el Área de Manejo Integral de Residuos AMIR, ubicada en el Campo La Cira Infantas.

6.3 DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA.

Imagen 19 vista aérea de las zonas del AMIR



Fuente: Investigación de los autores

La zona D no se incluye en la imagen por estar fuera del área

El proyecto AMIR, está compuesto por 4 zonas:

- Zona A
- Zona B
- Zona C
- Zona D

3.1 Zona A

Imagen 20 Celda de disposición final de residuos sólidos ordinarios (clausurada)



Fuente: Investigación de los autores

6.3.2 Zona B.

Imagen 21 zona de tratamiento de los residuos asociados a los lodos de perforación base agua (cortes, agua y lodos). Área 11.325 m²



Fuente: Investigación de los autores

6.3.2.1 Para recuperación de lodos base agua (zona B). Cuatro tanques de 400 barriles cada uno con 3 compartimientos de igual tamaño con su respectivo agitador, comunicados con un manifold con 2 bombas 6 x 8 y dos embudos de mezcla, debidamente techados e iluminados.

Dos centrifugas:

- SC4 con una capacidad de 50 gal/min: usada en operaciones de desecación y se puede también utilizar para la recuperación de la barita en lodos pesados. Estas unidades son accionadas por un motor eléctrico de 50 caballos de fuerza.
- 2172 con una capacidad de 100 gal/min.

Un tanque de almacenamiento de lodo con una capacidad de 40 barriles con su respectiva bomba centrífuga.

6.3.2.2 Para tratamiento de lodo desecho y agua residual asociada con al lodo base agua de perforación. Una unidad de deshidratación (dewatering) con:

- Dos tanques de dosificación de polímero con una capacidad de 30 barriles
- Un tanque de lodo con una capacidad de 60 barriles
- Un tanque de agua de 60 barriles de capacidad con su respectivo cuello de ganso para la retención de flóculos.
- Dos Frack tanks con una capacidad de 450 barriles y 500 barriles respectivamente, con bomba 4x3 para transferencia.

6.3.2.3 Para tratamiento de los cortes.

- Una centrifuga vertical de secado de cortes (VORTEX) con sus respectivos tornillos sinfín para transporte de sólidos húmedos y otro de descarga para sólido seco, y un tanque de almacenamiento de lodo recuperado de 40 barriles.
- Un catch tank para la recolección de residuos de sólidos secos provenientes del VORTEX con una capacidad de 120 barriles.
- Un catch tank con una capacidad de 250 barriles para agua de cementación y para el secado de flóculos provenientes de los tratamientos de aguas.
- Dos generadores para proporcionar la corriente eléctrica y un tanque de diesel.

6.3.2.4 Infraestructura

- Tres piscinas impermeabilizadas con geomembrana, con capacidad para 1200 barriles cada una, para el almacenamiento y tratamiento de agua.
- Dos piscinas con sello en arcilla de capacidad 1200 barriles cada una, para recibo de los cortes de perforación.
- Dos placas en concreto para el almacenamiento de los productos químicos.
- Una placa en concreto para tanque de combustible, con sus respectivos diques en mampostería.
- Una placa en concreto para el generador de energía.
- Placas en concreto para bombas centrífugas.
- Una placa en concreto para maniobra de maquinaria y equipos de tratamiento.
- Un área emulsionada para tanques de lodos, con sus respectivos diques en mampostería.
- Un área general emulsionada.
- Cunetas perimetrales y vías emulsionadas.

Adicionalmente se tienen los diferentes elementos y equipos con tecnologías de vanguardia, para llevar a cabo la operación en la zona.

6.3.3 Zona C.

Imagen 22 Zona de tratamiento de los residuos líquidos y sólidos acuosos con alto contenido de hidrocarburo (salmueras de reacondicionamiento de pozos (workover), aguas aceitosas y de facilidades de la operación).



Fuente: Investigación de los autores

6.3.3.1 Unidad de Tratamiento de Aguas aceitosas y de fluidos de servicio a pozos (UTA)

- Cuatro tanques metálicos cerrados con capacidad para 500 barriles CU, para almacenamiento de aguas o fluidos recuperados.
- Dos tanques metálicos cerrados con capacidad de 500 barriles CU, para el recibo de material a tratar.

- Dos tanques metálicos circulares, cónicos con agitadores de capacidad 70 barriles CU.
- Skimer metálico de capacidad 100 barriles.
- Un filtro de cartucho.

6.3.3.2 Unidad de Tratamiento de Lodos o emulsiones (UTL)

- Un evaporador de capacidad 80 barriles.
- Un tanque metálico, cónico de alimentación.
- Un desorbedor térmico de baja temperatura hasta 80° C.
- Dos tanques metálicos con capacidad 200 barriles CU.
- Una centrifuga horizontal.
- Una centrifuga vertical.

6.3.3.3 Infraestructura

- Dos piscinas con cubierta e impermeabilizadas con geomembrana, de capacidad 2000 barriles cada una.
- Una piscina en concreto con capacidad 3000 barriles.
- Un área general emulsionada.

- Placas en concreto para la ubicación de las unidades de tratamiento
- Cunetas perimetrales en concreto para aguas lluvias.
- Cunetas en concreto tipo cárcamo para el manejo de las aguas aceitosas.
- Skimmer para control de aguas aceitosas

Adicionalmente se tienen los diferentes elementos y equipos con tecnologías de vanguardia, instalados para llevar a cabo la operación en la zona.

6.3.4 Zona D Biorremediación o Landfarming.

Imagen 23 zodmes de disposición o landfarming



Fuente: investigación de los autores

6.3.4.1 Infraestructura

- Un área de 2900 m² con sello en arcilla para disposición en áreas.
- Un área de 1900 m² con sello en arcilla para volteo y aireación.
- Diques en arcilla para las dos áreas.
- Una piscina impermeabilizada con geomembrana.
- Cunetas perimetrales en concreto para el manejo de aguas lluvias.
- Cunetas en concreto tipo cárcamo para el manejo de las aguas aceitosas.

Como complemento están en servicio, para las empresas que operen en el AMIR:

- Una caseta para oficinas y laboratorio con servicios.
- Una caseta para portería con servicios.
- Una caseta para baños.
- Una caseta para almacenamiento temporal de los residuos ordinarios (reciclables e impregnados de hidrocarburos)
- Red de energía y de acueducto.
- Un skimmer para el manejo de las aguas aceitosas.

6.4. DESCRIPCIÓN DE PROCESOS.

Tratamiento Residuos Asociados a los Lodos de Perforación Base Agua (cortes, agua y lodos), Zona B.

Tabla 11 Descripción y clasificación de los residuos de perforación

ACTIVIDAD	RESIDUO	MANEJO Y TRATAMIENTO	PRODUCTO	DISPOSICIÓN FINAL
Perforación	Cortes BA	Vortex	Cortes secos	Zodmes
	Agua con lodo	Dewatering	Agua dewatering Agua tratamiento	Reutilización. Reutilización-Riego
	Lodo	Centrifugado y agitación	Lodo para reutilización	Reutilización.

Fuente: Proyecto AMIR

6.4.1 Lodos base agua. En el tanque de almacenamiento número 1, de volumen aproximado de 300 barriles, se almacena lodo con peso promedio de 9 a 9,2 ppg, y con un bajo MBT menor o igual a 8, este lodo se prepara para contingencia por pérdidas en pozo o para el inicio de cualquiera de las fases de perforación.

En el tanque número 2 se recibe lodo para reacondicionamiento proveniente de los pozos, se determina el MBT y peso inicial, para la limpieza se pasa a la centrifuga 2172 sin adicionar químico, se repiten las pruebas de MBT y peso si no cumple los parámetros requeridos se vuelve a pasar por la centrifuga 2172 adicionando química (si se requiere dilución para ajustar las propiedades se adicionara agua fresca o agua dewatering) para evitar la degradación del lodo durante el almacenamiento y transporte, dejando el producto en condiciones requeridas para reutilizar.

Los tanques 3 y 4 se utilizarán para el almacenamiento de lodo y agua de dewatering durante el proceso.

El lodo desecho será pasado por la unidad de dewatering de donde resultan dos productos: agua y sólidos. El agua de dewatering reutilizable se enviará al pozo para preparación o dilución de lodo nuevo con la coordinación del ingeniero de fluidos, el agua que se deseche se enviará a las piscinas de tratamiento. El sólido es transportado hasta un zodmes, para mezcla con material de aporte y disposición final por terrazas.

6.4.2 Tratamiento de agua asociada con los lodos de perforación. El agua traída desde los pozos es depositada en forma directa en las piscinas para tratamiento, al igual que el agua producida por la unidad de dewatering que cuyas características la hacen descartable para reutilizar.

En las piscinas de la Zona B, se lleva a cabo el tratamiento que incluye procesos de coagulación, floculación, ajuste de pH y sedimentación, empleando los químicos requeridos, de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de jarras en laboratorio. Igualmente se realizará cualquier ajuste de pH que sea necesario y la aplicación de hipoclorito de calcio para control bacteriano o desinfección.

El agua tratada será monitoreada in situ y cumplidos los parámetros será dispuesta por riego con carro tanques, en vías y plataformas de locaciones del campo, en áreas distantes de cuerpos de agua y de comunidad.

6.4.3 Proceso de Centrifugado y Secado de Cortes de Perforación (VORTEX).

Se reciben los cortes húmedos proveniente de los pozos en las piscinas destinadas para ello, se cargan estos con una retroexcavadora al tornillo transportador que alimenta la centrifuga vertical (Vortex), esta separa: la parte liquida a un tanque de almacenamiento con una capacidad de 40 barriles, la parte sólida (cortes secos) caen a un tornillo sinfín hasta el catch tank de capacidad de 120 barriles debidamente tapado, desde allí es transportada hasta un zodmes,

para mezcla con material de aporte y disposición final por terrazas. La parte líquida del lodo recuperado se enviara para dewatering final.

6.4.4 Tratamiento de Residuos Aceitosos de la Operación. Por efectos de claridad en el tema se incluye de nuevo la tabla # 4 del capítulo número 3

Clasificación de los residuos aceitosos

Tipo de Residuo	Descripción del Residuo	Actividad generadora del residuo
1. Fluidos residuales Aceitosos de la operación y/o de Reacondicionamiento de pozos (workover)	Fluidos residuales base aceite contaminados con ripio, sólidos y emulsiones, tales como arranques de pozo "postdrilling", fluidos de sumtanks, skimmers y/o trampas de grasa, contrapozos, entre otros. Residuos generados durante la reactivación de pozos. Salmueras para operaciones de control a pozos, contaminadas con crudo y sólidos.	Operación y producción
2. Geles, polímeros, espumas de limpieza, gomas y sus derivados y píldoras viscosas.	Retornos de trabajos de estimulación a pozos, basados en sustancias poliméricas sintéticas de medio y alto peso molecular, así como espumas siliconadas.	Producción trabajos a pozos.
3. Suelo contaminado con alto contenido de hidrocarburo.	Suelo (tierras) proveniente de contaminaciones con hidrocarburo durante perforaciones a pozos y trabajos de estimulación (estimulación a pozos) y reacondicionamiento de pozos (workover).	Producción y, Reacondicionamiento de pozos (workover).
4. Fluidos aceitosos de producción contaminados con sólidos y emulsiones estables.	Fluidos de producción provenientes, principalmente de saturaciones de la interfase de gunbarrel y otras vasijas, tales como FWKO's.	Producción
5. Borrás o fondos provenientes de la limpieza de vasijas en facilidades de producción.	Sólidos y depósitos de fondo en vasijas que hacen parte de las facilidades de producción, tales como separadores, tanques de prueba, skimmers, lechos de secado de plantas de inyección de agua, decantadores, gunbarrel, entre otras vasijas.	Producción
6. Aguas aceitosas de lavado de vasijas.	Residuos líquidos aceitosos producto del lavado de vasijas como fractanks, catchtanks, tanques escuadra, tanques cilíndricos, entre otros. En esta clasificación se incluyen las aguas aceitosas que provienen de los contrapozos y contiene sólidos.	Producción, Reacondicionamiento de pozos (workover) y Perforación.
7. Medios filtrantes	Material filtrante contaminado con sólidos e	Producción

Tipo de Residuo	Descripción del Residuo	Actividad generadora del residuo
provenientes de la limpieza de filtros de las plantas de inyección de agua	hidrocarburo.	
8. Mogo Mogo	Emulsión parafinita con alto contenido de sólidos que forma un nata y proviene de la interfase de los tratadores térmicos.	Producción

Fuente: Proyecto AMIR

Tabla 12 clasificación final de los residuos aceitosos

ACTIVIDAD	RESIDUOS	MANEJO Y TRATAMIENTO	PRODUCTO	DISPOSICIÓN FINAL
Limpieza de tanques, cajas, API.	Sólidos y líquido – Acuoso Emulsiones Con %>HC	UDT- UTL	Crudo Sólido Agua	Operación Comercialización Biorremediación UTA
Facilidades y operación.	Sólido, Suelo, lodos con bajo contenido de HC	Biorremediación	Material tratado	Zodmes
Reacondicionamiento de pozos (workover)	Líquido	UTA	Salmuera Agua	Reutilización Reinyección
	Sólido	Biorremediación	Material tratado	Reutilización

Fuente: Proyecto AMIR

6.5 Clasificación por grupos de los residuos aceitosos

6.5.1 Grupo 1

6.5.1.1 Fluidos Acuosos Contaminados. Se consideran dentro de esta categoría todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- Agua Min 70%
- Sólidos + Aceite Max 30%

El tratamiento ofrecido debe ser Físico – Químico - Mecánico y debe asegurar el manejo en tanques sellados del fluido, garantizando la separación de las fases aceitosas, posteriormente por floculación y precipitación la separación de los sólidos, las características mínimas del agua a retornar a proceso es la siguiente:

- pH 6 – 8
- Sólidos Max 10 ppm
- Bacterias sulfato reductoras Max 20 colonias / ml
- Turbiedad Max 20 NTU.

Las aguas tratadas mediante este sistema se estiman que son consideradas para sistemas de re-inyección o reutilización en la operación.

6.5.1.2 Fluidos Acuoso con alto contenido de cloruros Contaminados con crudo provenientes de las actividades de reacondicionamiento de pozo (workover). Se consideran dentro de esta categoría todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- Agua Min 80%
- Sólidos + Aceite Max 20%

El tratamiento ofrecido debe ser Físico – Químico - Mecánico y debe asegurar el manejo en tanques sellados del fluido, en los cuales se debe garantizar la separación de las fases aceitosas, posteriormente por floculación y precipitación la separación de los sólidos y el agua se debe filtrar para garantizar retención de las

partículas en suspensión en unos filtros que en lo menor o igual a 5 micras y garantizando que los cloruros presentes en el fluido se conserven, las características mínimas del agua a retornar para reacondicionamiento de pozos (workover) a la operadora es la siguiente:

- pH 6 – 8
- Sólidos Max 20 ppm
- Bacterias sulfato reductoras Max 20 colonias / ml
- Turbiedad Max 20 NTU.
- Calcios Max 300 ppm
- Sulfatos Max 250 ppm
- Grasas y Aceites AUSENTES

Se debe prever que en las operaciones de reacondicionamiento de pozo (workover) se generan fluidos con alto contenidos sólidos por demolición de tapones de cemento o píldoras residuales con características que pueden alterar la calidad del producto. Estos residuos es conveniente depositarlos en un lugar diferente a la piscina de recepción por lo tanto se debe contar con un tanque abierto de capacidad mínima 200 barriles, para recibo del mismo, así como para el almacenamiento del agua generada en su tratamiento cuando se evidencien condiciones especiales que ameriten la separación de este producto del volumen normal de retorno, sin que el almacenamiento de esta agua genere un sobre costo para la operadora.

Los sólidos retirados del material recibido se deben tratar para asegurar la disposición final de estos sin que esto genere un sobre costo para la operadora.

La operación, para la aplicación de este proceso o tecnología suministrará una piscina debidamente impermeabilizada con geomembrana, con techo o cubierta para evitar el aporte de aguas lluvias y de capacidad de 3.050 barriles para la recepción de los fluidos. De igual forma es responsabilidad del oferente instalar la capacidad necesaria para mantener disponibles 2.000 barriles de aguas tratadas para los requerimientos y de los equipos de reacondicionamiento de pozos (workover) en tanques cerrados.

Se debe contar con que se recibirá el fluido en el centro integral de manejo de residuos, los diferentes camiones de vacío los transportarán desde los pozos a este sitio y de igual forma estos mismos van y retiran las salmueras.

6.5.2 Grupo 2

6.5.2.1 Fluidos Aceitosos, Emulsiones, Mogo- Mogo y Iodos. Se consideran dentro de esta categoría todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- Aceite entre 30 -80 %
- Agua entre 0 – 50 %
- Sólidos entre 0 – 30 %

El tratamiento ofrecido debe ser un tratamiento Térmico – Químico en el cual el material a tratar tenga dos etapas una de Homogenización donde sea recirculado y se le adicionen los químicos necesarios (rompedores de emulsión, aglutinantes o

dispersores de parafinas, entre otros). Seguidamente debe pasar a la segunda etapa un tanque de proceso en el cual se le aplica calor indirectamente con el fin de usar la temperatura como catalizador de la química adicionada para romper la emulsión, posteriormente se debe elevar la temperatura para evaporar el agua impregnada. Los vapores deben ser retirados por medios mecánicos para su posterior condensación, en el caso que el proceso logre recuperar agua esta debe ser tratada como fluido del grupo 1. Así mismo se debe contar con el tratamiento y disposición final de los sólidos resultantes. El proceso debe permitir recuperar mínimo el 60% del aceite inicialmente impregnado en el fluido. El aceite recuperado debe tener un BS&W menor o igual al 2% para el caso del crudo recuperado del residuo Tipo Mogo – Mogo y un BSW máximo del 4% para el aceite recuperado de otros residuos .

6.5.3 Grupo 3

6.5.3.1 Sólidos Aceitosos y Borrás. Se consideran dentro de esta categoría todos los sólidos y fluidos que tengan las siguientes características:

- Sólidos entre 30 – 80 %
- Aceite entre 20 -60 %
- Agua entre 0 – 25 %

El tratamiento ofrecido debe ser un tratamiento Térmico en el cual el material a tratar sea sometido a calor para lograr la evaporación de los fluidos impregnados en los sólidos, agua y aceite, los vapores deben ser retirados para posteriormente ser condensados y separados por diferencia de densidades dejando los sólidos completamente inertes. El proceso debe permitir recuperar mínimo el 40% del aceite inicialmente presente en el sólido con un BS&W menor o igual al 2%. El

combustible utilizado será gas y se debe contar e incluir el costo dentro de la tarifa por unidad de residuo tratado.

Se debe contar debe asegurar el tratamiento del Agua y los sólidos resultantes de este proceso, sin que esto genere un sobre costo para La operación, los costos de tratamiento de estos productos resultantes deben estar incluidos en la tarifa propuesta.

6.5.4 Grupo 4

6.5.4.1 Residuos sólidos con menor contenido de hidrocarburo. Se consideran dentro de esta categoría todos los fluidos y sólidos que tengan las siguientes características:

- Sólidos entre 30 – 90 %
- Aceite entre 0 – 10 %
- Agua entre 0 – 30 %

Los residuos clasificados dentro de este grupo deben ser tratados mediante Bio remediación con bacterias o landfarming, mediante la homogenización de los residuos, aplicación de los fertilizantes y conservación de las cepas bacterianas. Se debe extender conformando las eras a una altura no mayor de 40 cm. El contenido de grasas y aceites, TPH, pH, humedad y otros parámetros del material a disponer finalmente debe cumplir con el protocolo de Louisiana sección 29B. Una vez alcanzado los valores de disposición final se recogen las eras y se toma la muestra para ser enviada al laboratorio y posteriormente certificar los residuos por la autoridad ambiental.

6.6 TRATAMIENTOS

6.6.1 Tratamiento Residuos Líquidos Aceitosos (fluidos de servicio a pozos y aguas aceitosas), Zona C, UTA. El tratamiento realizado es Físico – Químico - Mecánico y asegura el manejo en tanques sellados del fluido, en los cuales se garantiza la separación de las fases aceitosas, posteriormente por floculación y precipitación-separación de los sólidos y el agua se debe filtrar, se retienen las partículas en suspensión en unos filtros de menor o igual a 5 micras y garantizando que los cloruros presentes en el fluido conserven las características mínimas del agua a retornar para reacondicionamiento de pozos (workover) a la operadora.

6.6.2 Tratamiento Residuos Acuosos Contaminados con Hidrocarburo (Iodos y emulsiones aceitosas), Zona C, UTL. Tratamiento Térmico – Químico en el cual el material a tratar tiene dos etapas una de Homogenización donde sea recirculado y se le adicionen los químicos necesarios (rompedores de emulsión, aglutinantes o dispersores de parafinas, entre otros). Seguidamente debe pasar a la segunda etapa un tanque de proceso en el cual se le aplica calor indirectamente con el fin de usar la temperatura como catalizador de la química adicionada para romper la emulsión, posteriormente se eleva la temperatura hasta 80° C para evaporar el agua impregnada. Los vapores son retirados por medios mecánicos para su posterior condensación, en el caso que el proceso logre recuperar agua esta es tratada como fluido del grupo 1. Así mismo se garantiza el tratamiento y disposición final de los sólidos resultantes. El proceso permite recuperar mínimo el 60% del aceite inicialmente impregnado en el fluido.

6.6.3 Tratamiento de los residuos líquidos y sólidos acuosos con alto contenido de hidrocarburo (salmueras de reacondicionamiento de pozos (workover), aguas aceitosas y de facilidades de la operación), Zona C.

6.6.3.1 Salmueras de reacondicionamiento de pozos (workover) y Aguas Aceitosas. Se consideran dentro de esta categoría todos los fluidos que tengan las siguientes características:

- Agua min. 80%
- Sólidos + Aceite Max 20%

El residuo será recibido en la piscina No. 1 de capacidad 45 m³ (6 m X 5 m X 1,5 m) (283 barriles), impermeabilizada con geomembrana y debidamente acondicionada con un sistema de cubierta tipo modular o techo para evitar la dilución con aguas lluvias. El tratamiento es Físico – Químico – Mecánico, con sistema de tanques sellados, en el cual se asegura la separación de la fase aceitosas, para posteriormente con agitación por floculación y precipitación hacer separación de los sólidos y el agua, la cual se filtra para garantizar retención de las partículas en suspensión en unos filtros de diámetro menor o igual a 2 micras. El proceso garantiza que los cloruros presentes en el fluido se conserven.

El agua resultante o salmuera de retorno será enviada para reutilización en los equipos de reacondicionamiento de pozos (workover). El sólido se pasará al área de tratamiento para biorremediación o landfarming. El aceite residual será transportado por carro tanques para su comercialización por parte de la operadora.

Este proceso ya está asegurado y actualmente se viene desarrollando en la antigua planta de inyección 2, con sistema de tanques herméticos propiedad de la compañía contratada por la operadora y en él se garantiza la reutilización del 100% del agua o salmuera recuperada.

6.6.3.2 Sólidos Acuosos Con Alto Contenido de Hidrocarburos o Residuos de Facilidades de la Operación. El material residual es transportado desde las facilidades de la operación o punto de generación hasta el AMIR, donde se deposita en la piscina No 3, impermeabilizada en concreto donde se inicia el proceso de tratamiento mediante el cual se separan las fases: sólido, aceite, agua. El sólido es enviado a la zona D o de biorremediación. El aceite recuperado es transportado por carro tanques para su comercialización. El agua es enviada a la piscina No 2 para tratamiento mediante la adición de sulfato de aluminio o hidróxido de calcio para clarificar y nivelar pH y una vez verificados los parámetros, es desplazada por tubería hasta la planta deshidratadora El Centro donde entrará al sistema de reinyección.

6.6.4 Tratamiento de Residuos por Biorremediación o Landfarming, Zona D.

6.6.4.1 Tipos de Residuos a tratar:

- Tierras contaminadas por regueros y lodos con crudo.
- Los residuos con TPH promedio inferior del 10%.

Este proceso contará con dos áreas de recibo o plataformas de 2.900 m² y 1.900 m², con cunetas perimetrales en concreto para el manejo de lixiviados o aguas contaminadas con crudo generadas por la deshidratación del material y recogidas en una piscina ubicada en la parte baja, debidamente impermeabilizada con geomembrana, desde la cual se envía por sistema de bombeo hacia la piscina No2 de la zona C para el respectivo tratamiento y disposición final al sistema de reinyección para recuperación secundaria de hidrocarburos.

El sólido deshidratado dispuesto en plataforma de tratamiento es mezclado mediante una retroexcavadora con material de préstamo (tierra) en proporción 1:3 hasta su homogenización para su posterior tratamiento biológico mediante la adición del ecobiol y cal.

Previo a la homogenización de la mezcla en un tanque o piscina con capacidad 50 barriles se preparara el ecobiol cuyo volumen dependerá de la cantidad de material tratado y la concentración de hidrocarburo existente en el residuo. Este caldo bacteriano se debe oxigenar durante 36 horas para garantizar el crecimiento y sostenibilidad de las bacterias. La aplicación de este producto se realizará al material homogenizado mediante el método de aspersion o riego para nuevamente ser mezclado mediante retroexcavadora.

Una vez homogenizado el material se dispone mediante buldócer en eras con capas de hasta 40 cm de espesor para continuar con el proceso biológico de degradación del hidrocarburo presente en el residuo.

La disposición final se realizará mediante volquetas normales con capacidad de 6 m³ hasta los sitios seleccionados por la compañía operadora y debidamente acondicionados para tal fin. Para la disposición final el contenido de grasa, aceites, TPH y humedad deberá cumplir con lo establecido en el protocolo Louisiana 29B.

Este monitoreo se realizará mensualmente de forma in situ con muestra compuesta de cada una de las eras.

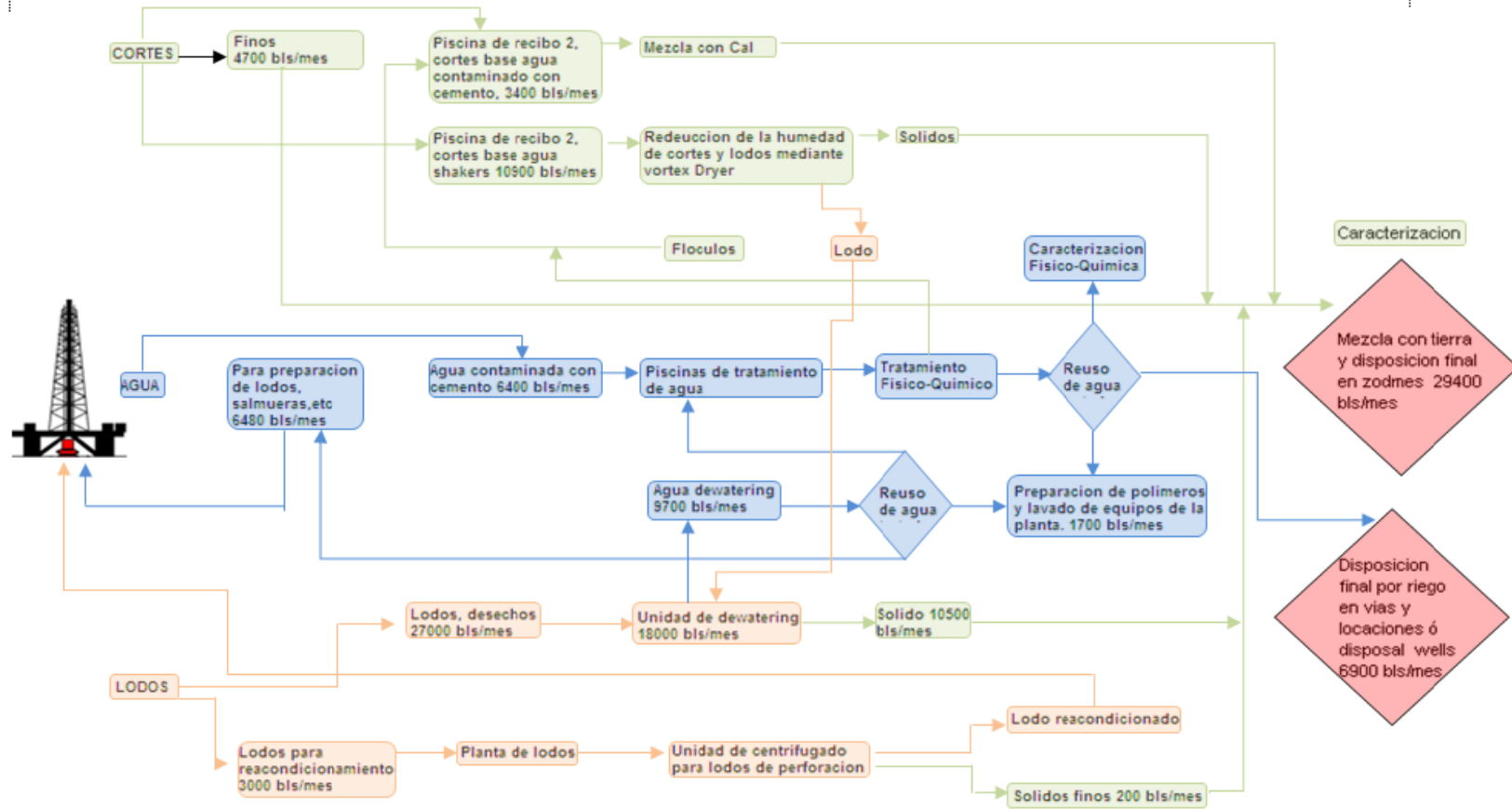
Todos los residuos son analizados al recibirlos en el sitio, para su caracterización y direccionamiento de acuerdo a los resultados del ensayo mediante la utilización de la retorta o análisis que se requiera, apoyados en el laboratorio, lo que garantiza la optimización del proceso de tratamiento de acuerdo al porcentaje de crudo, agua o sólidos según sea el caso. Así mismo los productos o resultantes se monitorean previa disposición final conforme a la normatividad vigente.

Imagen 24 Vista aérea general del proyecto AMIR



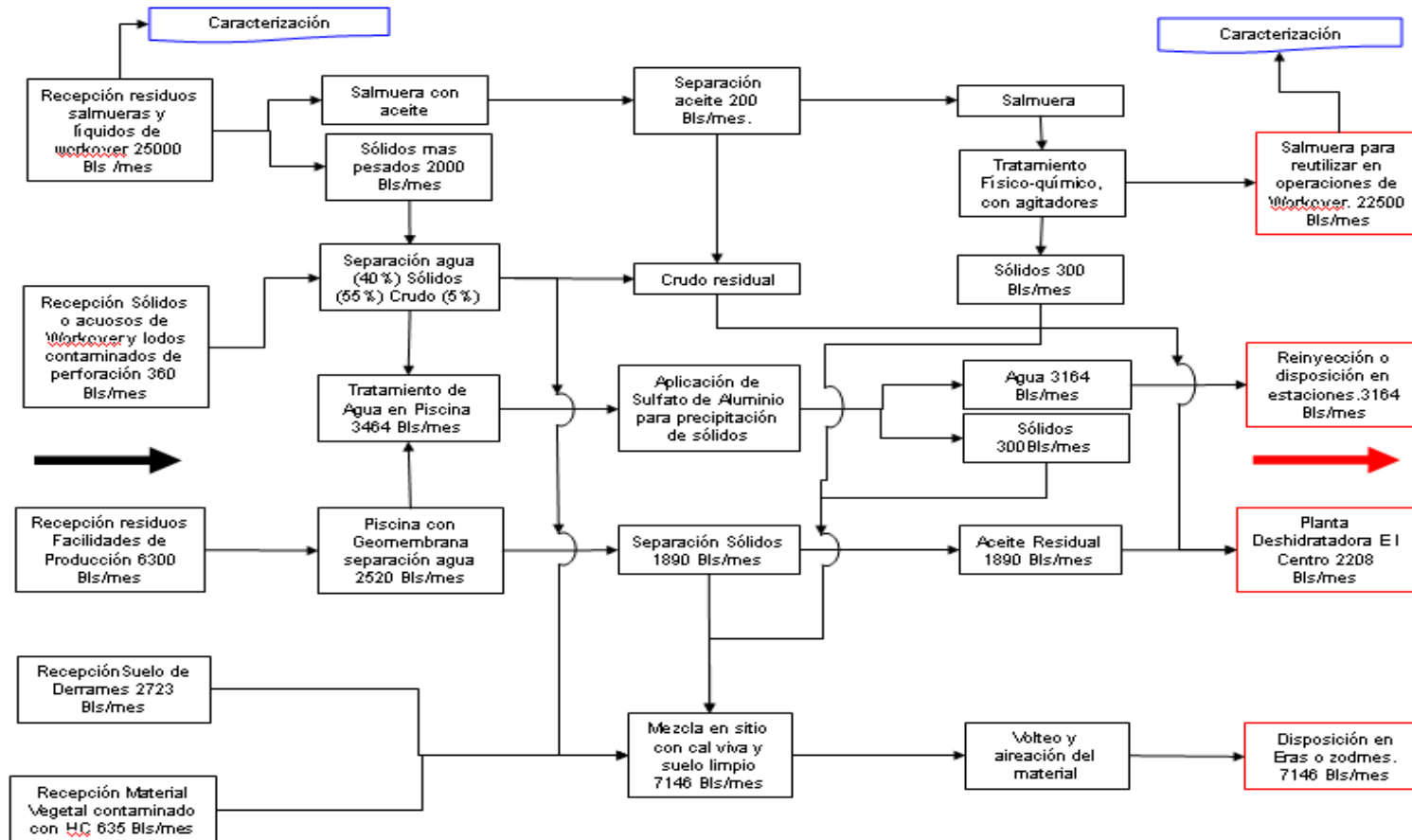
Fuente: Investigación de los autores

Figura 16 diagrama de flujo y balance de masa, del proceso de tratamiento de residuos asociados con el lodo base agua de perforación, en el área de manejo integral AMIR.



Fuente: Proyecto AMIR, Modificado por autores

Figura 17 Diagrama de flujo del tratamiento de residuos sólidos y líquidos aceitosos de reacondicionamiento de pozos (workover) y de la operación en el Área de Manejo de Residuos



Fuente: Proyecto AMIR

6.7 EQUIPO MÍNIMO REQUERIDO

Se debe suministrar, sin limitarse a esto como mínimo el siguiente equipo para el correcto funcionamiento del AMIR

- Equipo para tratamiento de aguas en tanques cerrados con sistema de floculación y filtración a máximo 5 micras, con capacidad de 1.000 barriles día.
- Equipo físico químico para deshidratación de fluidos aceitosos con sistemas térmicos y de floculación con capacidad de 150 barriles día.
- Unidad de desorción térmica con sistemas de cargue de material y foso de cenizas para material tratado.
- Tanques de entrega de Agua tratada con una capacidad total de 2.000 barriles.
- Catch tank para entrega de crudo recuperado con una capacidad total de 500 barriles.
- Retroexcavadora de Oruga para el manejo del material dentro del AMIR.
- Volqueta Sellada para el transporte del material tratado a la zona de disposición final.
- Camión de vacío para el manejo del material dentro del AMIR y entrega del crudo recuperado a la operadora.
- Dos Frack tanks de contingencia para el manejo de eventuales picos en la generación de residuos

- Retroexcavadora de oruga tipo 200, para el manejo del material en el área de disposición final
- Equipo de laboratorio: centrifuga, retorta, balanza y espectrofotómetro.
- Equipo de generación de energía
- Equipos de bombeo para el trasiego del material dentro del AMIR.

6.8 ANÁLISIS ECONÓMICO

Tabla 13 Recuperación lodos base agua de perforación

VOLUMEN TOTAL RECUPERADO	200, 000 barriles
VOLUMEN RECUPERADO /POZO	600 barriles
AHORRO PROMEDIO POR POZO	US\$ 16.528
AHORRO POR RECUPERACIÓN	US\$ 2.748.514

Fuente: Proyecto AMIR, modificado por autores

Tabla 14 Tratamiento fluidos de servicio a pozos y aguas aceitosas

VOLUMEN TOTAL RECIBIDO Y TRATADO	399.400 barriles
VOLUMEN DE FLUIDOS RECUPERADOS	380.000 barriles
AHORRO POR RECUPERACIÓN ANUAL	US\$ 1.870.000

Fuente: Proyecto AMIR, modificado por autores

Tabla 15 Tratamiento de emulsiones y lodos

VOLUMEN TOTAL RECIBIDO Y TRATADO	107,746 barriles
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DÍA	600 barriles
VOLUMEN DE CRUDO RECUPERADO	30.800 barriles
VOLUMEN DE AGUA RETORNADA	70, 000 barriles
CRUDO RECUPERADO/DÍA	200 barriles
AHORRO POR CRUDO RECUPERADO	US\$ 1.694.000

Fuente: Proyecto AMIR, modificado por autores

6.9 DOCUMENTACIÓN EN CAMPO SURIA (META)

Se realizó una visita al campo Suria, en donde se documentó el proceso de tratamiento y disposición de cortes de perforación.

El bajo contenido de agua de estos cortes facilita su tratamiento disponiéndose de una manera sencilla en pequeñas parcelas de tierra. El tratamiento se realiza a base de cal, con la que se puede extraer el contenido de agua de los cortes de perforación.

Las zonas de disposición se recuperan en un tiempo aproximado de 35 a 40 días. La documentación es exclusivamente visual, pues la empresa perforadora (Nabors) no permitió la documentación teórica de estos procesos.

Imagen 25 zona de disposición de recortes Rig 338 Suria



Fuente: investigación de los autores

En la imagen se observa la revegetación de la zona, tiempo de disposición 47 días

Imagen 26 zona de disposición de recortes Rig 202 Suria



Fuente: investigación de los autores, Tiempo de disposición 29 días.

Imagen 27 zona de disposición de recortes Rig 202 Suria



Fuente: investigación de los autores, Tiempo de disposición 16 días

Imágenes (26 y 27) Comparación de zonas de disposición



Fuente: Investigación de los autores

En esta imagen se puede apreciar la diferencia de tonalidades de la tierra, la imagen de la derecha tiene un mayor contenido de humedad. Por tal motivo su color es más oscuro. Una vez seca la tierra inicia su proceso de revegetación.

CONCLUSIONES

La implementación de áreas de manejo integral de residuo, ya sean líquidos o sólidos, con determinado contenido de hidrocarburo es determinante para reducir y minimizar la producción de residuos en los diversos campos colombianos logrando así disminuir el impacto adverso sobre el medio ambiente, a demás de obtener un significativo beneficio económico.

La clasificación de los residuos peligrosos y no peligrosos, permitió separar adecuadamente los residuos en la fuente generadora e impedir que otros residuos se vean contaminados por la mezcla de estos. Además facilitó identificar los residuos aprovechables, los peligrosos o especiales y los orgánicos.

Este enfoque puede reducir el volumen de residuos contaminados y, en consecuencia los costes de gestión de residuos. Tecnologías para el tratamiento y eliminación de residuos no contaminados son relativamente simples y no muy costosas.

Investigar más a fondo el uso de equipos de control de sólidos y sistemas de manipulación de residuos para proporcionar un aumento en la capacidad de reducción, reciclaje y reutilización.

Hacer una evaluación y clasificación efectiva del tipo de residuos generados en operaciones de E&P es muy importante para generar un aprovechamiento integral de los residuos.

En el proyecto AMIR mediante un correcto tratamiento físico-mecánico se lograron convertir 4000 bls de residuo sólido, en 4 barriles de ceniza inocua.

Mediante el óptimo diseño de reutilización de aguas de producción se logro recuperar alrededor de 380 mil barriles de fluidos para servicio a pozos.

La tecnología disponible en Colombia para el manejo, tratamiento y disposición final de residuos de E&P se podría decir que es ineficiente, dejando muy pocos e ineficaces métodos para el tratamiento de estos residuos, es el caso del Landfarming, que genera grandes volúmenes de tierra y residuo mezclados, para luego tardar entre 4 meses y un año en rehabilitar la zona de mezclado.

El beneficio económico que se genera con el diseño de estas plantas de tratamiento y reutilización de residuos es muy significativo para las compañías, además de reducir el impacto ambiental que estos generan, situación que por cierto ubica a las compañías en un rango privilegiado por dichas mejoras ambientales.

La legislación colombiana en aspectos de disposición final de residuos aceitosos es ineficiente debido a que, la generación de normas que controlan este aspecto a nivel nacional aun se encuentran en una etapa de desarrollo y maduración, lo cual permite dejar el control de esta situación a las normas establecidas en otros países y pobremente adaptadas al nuestro.

El manejo y tratamiento de los residuos aceitosos generados por las operaciones dadas en la industria petrolera colombiana, ya es visto como una inversión a corto plazo gracias a que evita gastos adicionales de dinero en la preparación de nuevos lodos de perforación, salmueras entre otros y optimiza el aprovechamiento del residuo, convirtiéndolo en un producto procesable, lo que consecuentemente trae consigo la disminución del volumen a disponer y minimiza en gran proporción la afectación al medio ambiente.

RECOMENDACIONES

Se recomienda desarrollar trabajos en los cuales se realice la implementación de proyectos pilotos de las diferentes técnicas para el manejo de residuos aceitosos existentes en el mundo que difieran de los actualmente aplicados en la industria colombiana.

Se deben realizar proyectos para la identificación y clasificación de los residuos aceitosos en los diversos campos colombianos, y así generar un aprovechamiento de estos.

Realizar factibilidades para la implementación de nuevas tecnologías de disposición final de residuos aceitosos en Colombia, como las mostradas en este trabajo; **BIOVENTEO, EXTRACCION POR VAPOR** etc. Tecnologías mucho más amigables con el medio ambiente

BIBLIOGRAFIA

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)

CARVAJAL ORTIZ, Luis Henry, GUTIERREZ, Fredy Jara. Aspectos técnicos sobre derrames de crudo, Universidad Industrial De Santander, Facultad De Ciencias Físicoquímicas

CASTELLS, Xavier Elías. Reciclaje de residuos industriales. Ediciones Díaz de Santos, S.A 2000.

COLLAZOS PEÑALOZA, Héctor. DUQUE MUÑOZ, Ramón. Residuos sólidos. Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental ACODAL. Quinta edición. 1998.

Constitución política de Colombia de 1991

Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos fronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. NACIONES UNIDAS-1989.

Definición de las características de peligrosidad según la Organización de las Naciones Unidas (Organización de las Naciones Unidas, 1991).

Definición de las características de peligrosidad según la Organización de las Naciones Unidas Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente Organización de las Naciones Unidas, 1991).

Decreto 1594 de 26 de junio de 1984 del ministerio de agricultura. Por el cual se reglamentara parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI- Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III-Libro I- del Decreto ley de 1974 en cuanto a los usos del agua y de residuos líquidos.

Decreto 1220 de 2005

Decreto- Ley 2811 del 18 de diciembre de 1974. Por el cual dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Declaración de RIO sobre el medio ambiente y el desarrollo en 1992.

EPA, Recursos de Información. Exención de los residuos de la exploración y producción de petróleo crudo y gas natural de los reglamentos federales de residuos peligrosos.

Exploration and Production (E&P) Wastes Management Guidelines. Reporte No. 2.58/196 Septiembre de 1993.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.1 In Situ Biological Treatment.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.3 In situ Thermal/ Treatment

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGIES ROUNDTABLE. Technologic screening Matrix and reference guide, version 4.0. 3.4 Ex Situ Biological Treatment.

Guía para la gestión integral de Residuos Peligrosos – Fundamentos. Capitulo. Pgs 16-18.

International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollution. Guías Para La Minimización Y Manejo De Residuos Provenientes De Derrames De Hidrocarburos. Volumen doce, 24 p

K.M. BANSAL, SPE, CONOCO INC. AND SUGIARTO, SPE, CONOCO INDONESIA INC. Exploration and Production Operations - Waste Management A Comparative Overview: US and Indonesia Cases, 1999.16 p.

Ley 99 de del 22 de diciembre de 1993 Por el cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Publico encargado de la gestión y conservación de medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental- SINA y se dictan otras disposiciones.

Norma Louisiana 29B. Norma estadounidense. Por la cual se reglamentan todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente. Titulo 43, parte XIX, orden estatal 29B. Capítulo 3 están contemplados todos aquellos criterios y parámetros tenidos en cuenta para el manejo y disposición final de todos los residuos ocasionados por actividades industriales.

Programa regional del manejo de residuos peligrosos del CEPIS

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, diccionario de la lengua española (22ª ED.) (2 VOLS.).

Resolución 2309 del 24 de febrero de 1986 del Ministerio de Salud.

RINCÓN LIZCANO, Martha Cecilia. 2004. Estudio de la Biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental. Capítulo 4. Biorremediación. Págs. 13-14.

VARGAS GALLEGO, Paola Andrea; CUÉLLAR, René Ricardo; Dussán, Jenny. Biorremediación de residuos del petróleo.