

Impactos Ambientales Derivados de la Generación Potencial de Lixiviados de Cortes de
Perforación.

Maria Gabriela Daza Ortega, Jesús Miguel Ospino Mojica

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos.

Director

Ing. Kathy Margarita Daza Brochero

Magister en Gestión Integral del Riesgo Laboral

Codirector

Lic. Carmen Infante Gonzales

Ph.D. Ciencias. Ecología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios quien como guía ha estado presente en nuestras vidas, bendiciéndonos y dándonos fuerzas para continuar con nuestras metas.

A nuestros padres que nos han ayudado a crecer con mucho amor, cariño y sacrificio. Por ser luchadores, que con gran esfuerzo nos han sacado adelante. Por sus consejos, su apoyo incondicional y por creer en nosotros siempre. Por ser los mejores ejemplos a seguir, porque gracias a ellos somos lo que somos hoy en día.

A nuestros abuelos por brindarnos tanto cariño, amarnos, por sus enseñanzas.

A nuestros hermanos, por siempre creer en nosotros, por darnos su apoyo y su amor. Gracias por compartir sus vidas con nosotros. Gracias por preocuparse por su nosotros y por sentirse orgullosos nosotros.

Finalmente queremos dedicar esta tesis a todos nuestros amigos y amigas del colegio y de la universidad, por apoyarnos cuando más los necesitamos, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día.

María Gabriela Daza Ortega

Jesús Miguel Ospino Mojica

Agradecimientos

A Dios quien nos brinda sabiduría.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería de petróleos por brindarnos excelencia académica y formarnos como unos profesionales competentes.

A la ingeniera Kathy Margarita Daza Brochero por su apoyo, su disponibilidad, su acompañamiento constante durante el desarrollo de la tesis.

A la Carmen Infante Gonzales por su apoyo, su disponibilidad y su orientación incondicional en el desarrollo de la tesis.

A nuestras familias que fueron el motor de cada una de nuestras vidas para cumplir esta meta.

A los profesores de la universidad Industrial de Santander por su colaboración, motivación, constancia y disciplina

Finalmente, a nuestros compañeros con quienes hemos compartido este proceso de formación.

Contenido

Introducción	14
1. Fundamentación teórica	15
1.1. Definiciones	15
2. Normatividad ambiental que se debe cumplir en cuanto al tratamiento y disposición de cortes y lixiviados en la industria de los hidrocarburos	19
2.1. Entrada en detalle del decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005	23
3. Método para determinar la característica de toxicidad por lixiviación (test TCLP - toxicity characteristics leaching procedure).	30
3.1. Ámbito y aplicabilidad.	30
3.2. Resumen del método.	31
3.3. Resultados.	32
4. Generalidades de las operaciones de perforación.	33
4.1. Lodos de perforación.	33
4.1.2. Clasificación de los lodos de perforación.	34
4.2. Cortes de perforación.	34
4.2.1. Composición de los cortes de perforación.	35
4.2.2. Clasificación de los cortes de perforación.	35
4.2.3. Indicadores de peligrosidad en los cortes de perforación.	36
4.2.4. Manejo de los cortes de perforación.	37
4.3. Sistemas de control de sólidos.	38
4.3.1. Unidad de secado de cortes.	38

4.3.2. Zarandas.	39
4.3.3. Hidrociclones.	40
4.3.4. Desarenadores.	43
4.3.5. Desarcilladores.	44
4.3.6. Centrifugas de decantación.	45
4.3.7. Limpiador de lodos – Mud cleaner.	46
5. Tratamiento de los cortes de perforación.	48
5.1. Tratamiento in situ.	49
5.2. Tratamiento ex situ.	49
5.3. Tratamientos físicos.	50
5.4. Tratamientos químicos	51
5.4.1. Solidificación / Estabilización.	51
5.4.2. Lavado y extracción con solventes.	56
5.5. Tratamientos biológicos	59
5.5.1. Biorremediación	59
5.6. Tratamientos térmicos.	64
5.6.1. Desorción térmica.	64
5.6.2. Incineración.	65
6. Disposición final de los recortes de perforación	67
6.1. Entierro	67
6.2. Fosa de recortes	67
6.3. Vertederos	68
7. Comparación técnico-económica de las metodologías para la eliminación y el control de lixiviados de los cortes de perforación.	69

8. Casos de estudio.	77
8.1 Bioestimulación de cortes de perforación en Tamaulipas, México.	78
8.2. Tratamiento de recortes pozo lqc-x1 ubicado en el sub andino norte, departamento de la paz, Bolivia.	81
9. Impactos ambientales	90
9.1 Lixiviados, generación y composición	90
9.2 Impactos ambientales de los cortes de perforación	91
9.2.1 Impacto al suelo.	92
9.2.2 Impacto a las aguas.	93
9.2.3 Impacto a la flora y a la fauna.	94
9.2.4 Impacto a las comunidades	94
9.2.3 Impacto al aire.	95
9.3 Evaluación de impactos ambientales	95
9.3.1 Clase (C).	95
9.3.2 Presencia (P).	96
9.3.3 Duración (D).	96
9.3.4 Evolución (E).	96
9.3.5 Magnitud (M).	97
9.3.6 Calificación ambiental del impacto (Ca).	97
9.4. Matriz de impactos ambientales derivados de la generación potencial de lixiviados de cortes de perforación.	98
10. Conclusiones	101
11. Recomendaciones	103
Referencias bibliográficas	104

Lista de Tablas

Tabla 1. Normatividad colombiana en el marco del manejo y disposición de residuos peligrosos.	19
Tabla 2. Límites permisibles de los diferentes parámetros basados en el protocolo de lousiana	29.22
Tabla 3. Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba tclp.	25
Tabla 4. Concentración máxima de metales pesados en la cal viva.	55
Tabla 5. Proporciones de la mezcla.	55
Tabla 6. Comparación técnica.	70
Tabla 7. Comparación económica.	73
Tabla 8. Observaciones de los tratamientos.	75
Tabla 9. Línea base ambiental de las biopilas.	84
Tabla 10. Resultados obtenidos en el tratamiento de los recortes de perforación provenientes del pozo lqc-x1.	89
Tabla 11. Clasificación de la importancia de los impactos de acuerdo al valor de la calificación ambiental.	98
Tabla 12. Matriz de impactos ambientales derivados de la generación de lixiviados de cortes de perforación.	99

Lista de Figuras

Figura 1. Zarandas	39
Figura 2. Hidrociclón	41
Figura 3. funcionamiento interno de un hidrociclón.	42
Figura 4. Desarenadores.	44
Figura 5. Desarcilladores.	45
Figura 6. Centrifugas de decantación.	46
Figura 7. Limpiador de lodos.	47
Figura 8. Lavado y extracción con solventes.	58
Figura 9. Caracterización de las tecnologías según su lugar de tratamiento	71
Figura 10. Clasificación de las tecnologías según el tipo de contaminante que eliminan o inmovilizan.	71
Figura 11. Clasificación de las tecnologías según la base del fluido de perforación utilizado.	72
Figura 12. Tiempos de tratamiento.	72
Figura 13. Grafica de costos.	74
Figura 14. Resultados de los experimentos.	80
Figura 15. Contenedores con recortes de perforación.	82
Figura 16. Cargue y transporte de recortes.	82
Figura 17. Fosa de recortes.	85
Figura 18. extendido de los recortes sobre la superficie	86
Figura 19. Secado de los recortes.	87
Figura 20. Toma de muestras buzón n°16.	88

RESUMEN

TÍTULO: IMPACTOS AMBIENTALES DERIVADOS DE LA GENERACIÓN POTENCIAL DE LIXIVIADOS DE CORTES DE PERFORACIÓN*

AUTORES: MARÍA GABRIELA DAZA ORTEGA, JESÚS MIGUEL OSPINO MOJICA **

PALABRAS CLAVE: IMPACTOS AMBIENTALES, LIXIVIADOS, RESIDUOS PELIGROSOS, TOXICIDAD, REACTIVIDAD, CONTAMINACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

La industria de los hidrocarburos genera grandes impactos ambientales inherentes a la perforación de pozos, producción y transporte de hidrocarburos, pero estos pueden ser controlados y prevenidos desde la identificación de los posibles riesgos de impacto ambiental y en caso de no lograr la prevención y el control del impacto, mitigarlo al máximo.

En las operaciones de perforación que realiza la industria de los hidrocarburos se generan cortes o ripios de perforación que deben cumplir con el tratamiento adecuado que permita eliminar o controlar lixiviados en el proceso evitando de esta manera la migración de estos componentes líquidos contaminantes hacia el subsuelo.

El propósito de esta investigación es proporcionar un documento que dé a conocer los principales impactos ambientales generados si no se llevan a cabo los respectivos tratamientos y la disposición adecuada de los cortes de perforación, exponer las tecnologías de tratamiento más utilizadas en la industria, realizar un análisis de la normatividad COLOMBIANA vigente y también un análisis de los costos y de los principales aspectos técnicos de las diferentes tecnologías de tratamiento que son realizadas a los cortes de perforación previo a su disposición.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingenierías de petróleos.
Director: Katty Margarita Daza Brochero, Maestría en Gestión Integral del Riesgo Laboral.

ABSTRACT

TITLE: ENVIRONMENTAL IMPACTS DERIVED FROM THE POTENTIAL GENERATION OF LIXIVIATES OF DRILLING CUTS*

AUTHORS: MARÍA GABRIELA DAZA ORTEGA, JESÚS MIGUEL OSPINO MOJICA**

KEYWORDS: ENVIRONMENTAL IMPACTS, LEACHATE, HAZARDOUS WASTE, TOXICITY, REACTIVITY, CONTAMINATION.

DESCRIPTION:

The hydrocarbon industry generates great environmental impacts inherent to well drilling, production and transport of hydrocarbons, but these can be controlled and prevented from identifying the possible environmental impact risks and in case of failure to achieve prevention and control of the impact, mitigate it to the maximum.

In the drilling operations carried out by the hydrocarbons industry, drilling cuttings are generated that must comply with the appropriate treatment to eliminate or control leachates in the process, thus avoiding the migration of these contaminating liquid components to the subsoil.

The purpose of this research is to provide a document that discloses the main environmental impacts generated if the respective treatments are not carried out and the proper disposition of the drilling cuts, expose the most used treatment technologies in the industry, perform a analysis of the current COLOMBIAN regulations and also an analysis of the costs and the main technical aspects of the different treatment technologies that are made to the drilling cuts prior to their disposal.

* Bachelor thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingenierías de petróleoos.
Director: Katty Margarita Daza Brochero, Maestría en Gestión Integral del Riesgo Laboral.

Introducción

Todas las actividades de la industria de los hidrocarburos ya sean de exploración o explotación generan impactos directos e indirectos potencialmente negativos para el medio ambiente, la afectación del suelo por derrames y la afectación de una especie por cambios en las condiciones del suelo son ejemplos de estos impactos. Durante la perforación de pozos se generan residuos tanto sólidos como líquidos que si no son tratados y finalmente dispuestos como es debido pueden generar un gran peligro ambiental. Los residuos sólidos generados en las operaciones de perforación de pozos, también llamados “cortes de perforación” en Colombia y cualquier parte del mundo deben cumplir con los análisis de lixiviados. Si un corte de perforación u otro desecho o residuo de cualquier naturaleza no cumple con los valores de lixiviados aceptables por la normatividad vigente conforme al decreto 4741 de 2005, debe someterse a una tecnología de remediación para asegurar que no lixivie.

1. Fundamentación teórica

1.1. Definiciones

Cortes de perforación: Pedazos de roca resultantes del corte de la broca, arrastrados a la superficie por el lodo de perforación. (NTC 4343, 1997).

Disposición final: Es el proceso de aislar y confinar los residuos o desechos peligrosos, en especial los no aprovechables, en lugares especialmente seleccionados, diseñados y debidamente autorizados, para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente. (Decreto 4741, 2005).

Encapsular: Proceso de envolvimiento de las moléculas de aceite, con el objeto de fijarlas y evitar su migración o movilidad. (NTC 4343, 1997).

Fijación: Proceso por el cual se inhibe la movilidad del aceite contenido en los cortes de perforación, impidiendo así su acción contaminante. (NTC 4343, 1997).

Gestión integral: Conjunto articulado e interrelacionado de acciones de política, normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de evaluación, seguimiento y monitoreo. Desde la prevención de la generación hasta la disposición final de los residuos o desechos peligrosos, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región. (Decreto 4741, 2005).

Lixiviado: La norma oficial mexicana NOM-083- SEMARNAT-2003 y la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos en su artículo 5 fracción XVI, definen a los lixiviados

como el “líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos en este caso cortes de perforación y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”

Lodo de perforación: Fluido empleado para retirar los cortes desde el interior del pozo, evitar que los fluidos de la formación se filtren al pozo durante la perforación, evitar el derrumbamiento del pozo y refrigerar y lubricar la sarta durante la perforación. Existen lodos base agua, base aceite y base sintética según los requerimientos del programa de perforación. (NTC 4343, 1997).

Manejo integral: Es la adopción de todas las medidas necesarias en las actividades de prevención, reducción y separación en la fuente, acopio, almacenamiento, transporte, aprovechamiento y/o valorización, tratamiento y/o disposición final, importación y exportación de residuos o desechos peligrosos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para proteger la salud humana y el ambiente contra los efectos nocivos temporales y/o permanentes que puedan derivarse de tales residuos o desechos. (Decreto 4741, 2005).

Metales pesados: Son una de las formas más peligrosas de contaminantes debido a que no presentan ningún tipo posible de degradación biológica o química, puede ser bioacumulados de diversas formas y permanecer en los organismos por largos períodos de tiempo. Se caracterizan por su alta conductividad eléctrica, por tener una densidad mayor a 6 g/cm³, y por poseer un peso específico mayor de 4,5. (NTC 4343, 1997).

Minimización: Acción de reducir al mínimo posible el volumen y peligrosidad de los residuos sólidos, a través de cualquier estrategia preventiva, procedimiento, método o técnica utilizada en la actividad generadora.

Remediación: Conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para reducir o eliminar los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos.

Residuo o desecho: Es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula. (Decreto 4741, 2005)

Residuo o desecho peligroso: Es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos. (Decreto 4741, 2005).

TCLP: El TCLP es un análisis que está diseñado para determinar la movilidad de los productos orgánicos e inorgánicos presentes en desechos líquidos, sólidos y multifásicos. Si un análisis total de los residuos demuestra que los constituyentes tóxicos no están presentes en los desechos, o que están presentes, pero a un nivel por debajo de las concentraciones reglamentarias apropiadas, el TCLP no necesita ejecutarse. Si un análisis de cualquiera de las fracciones líquidas del TCLP extraído, indica que un componente tóxico está presente en concentraciones tan altas que, incluso después de considerar la dilución de las otras fracciones del lixiviado, la concentración estaría por encima del nivel reglamentario para ese compuesto, entonces el desecho es peligroso. (EPA method 1311, 1992).

Riesgo: Probabilidad o posibilidad de que el manejo, la liberación al ambiente y la exposición a un material o residuo, ocasionen efectos adversos en la salud humana y/o al ambiente. (Decreto 4741, 2005).

Minimización: Acción de reducir al mínimo posible el volumen y peligrosidad de los residuos sólidos, a través de cualquier estrategia preventiva, procedimiento, método o técnica utilizada en la actividad generadora.

Tratamiento: Es el conjunto de operaciones, procesos o técnicas mediante los cuales se modifican las características de los residuos o desechos peligrosos, teniendo en cuenta el riesgo y grado de peligrosidad de estos, para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento y/o valorización o para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente. (Decreto 4741, 2005).

Tratamiento biológico. Las modificaciones o disminución de la concentración se realizan mediante la acción de bacterias propias del suelo, y se aplica tanto para residuos peligrosos como no peligrosos. (Méndez, r. Gómez, p. Ledesma, j. Cenicero, c., 2013).

Tratamiento físico: Procesos en el que mediante concentración y/o cambio de fase se modifican los constituyentes peligrosos a una forma más conveniente para su manejo posterior. (Méndez, r. Gómez, p. Ledesma, j. Cenicero, c., 2013).

Tratamiento térmico: Proceso en el que se usa alta temperatura para la destrucción de tóxicos, principalmente orgánicos. (Méndez, r. Gómez, p. Ledesma, j. Cenicero, c., 2013).

Tratamiento químico: Procesos en donde los constituyentes peligrosos son modificados mediante reacciones químicas. En algunos casos equivale a una neutralización del peligro; en otros casos excepcionales, el residuo podrá seguir siendo peligroso, pero en una forma más apropiada para su posterior manejo. (Méndez, r. Gómez, p. Ledesma, j. Cenicero, c., 2013).

2. Normatividad ambiental que se debe cumplir en cuanto al tratamiento y disposición de cortes y lixiviados en la industria de los hidrocarburos

En el marco de la normatividad ambiental en cuanto al tema del tratamiento y disposición lixiviados que se generan en la industria de los hidrocarburos no existen reglas que se apliquen universalmente. Las normas varían de un país a otro y en muchos casos las normas de un país o estado pueden ser utilizadas como referencia para otro, esto se debe a que existen factores en común entre los países que permiten que se puedan aplicar dichas normas como por ejemplo las condiciones climáticas.

Los cortes de perforación en Colombia y en cualquier parte del mundo deben cumplir con el test o análisis de lixiviados TCLP. Si un corte de perforación no cumple con los valores de lixiviados estipulados en la normatividad, debe someterse a una tecnología de remediación o tratamiento para asegurarse que no lixivie.

En Colombia las leyes y normas que se tienen en cuenta en materia de residuos peligrosos son las que se enuncian en la tabla 1.

Tabla 1.

Normatividad colombiana en el marco del manejo y disposición de residuos peligrosos.

Ley 23 de 1973	Firmada el 12 de diciembre de 1973 por la cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la república para expedir el código de recursos naturales y de protección al medio ambiente. Consta de 21 artículos en los cuales se decreta el medio ambiente como un patrimonio común, se define la contaminación como la alteración al medio ambiente por sustancias o formas de energía puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza en cantidades, concentraciones o niveles capaces de interferir con el bienestar y la
----------------	---

	salud de las personas, atentar contra la flora y la fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la nación o de particulares y todo elemento, combinación de elementos, o forma de energía que actual o potencialmente pueda producir alguna o algunas de las alteraciones ambientales descritas anteriormente se entiende como un contaminante. (Ley 23, 1973)
Decreto 2811 de 1974	Firmado el 18 de diciembre de 1974 por el cual se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente. El código formado por 340 artículos divididos en 2 libros. (Decreto 2811, 1974)
Ley 9 de 1979	Esta ley entró en vigencia el 24 de enero de 1979, por la cual se dictan medidas sanitarias, consta de 607 artículos por medio de los cuales se dictan las disposiciones para la protección del medio ambiente, suministro de agua, salud ocupacional entre otras. Por medio de esta ley se reglamenta el manejo y disposición de residuos sólidos. (Ley 9, 1979)
Resolución 2309 de 1986	Firmada el 24 de febrero de 1986 por la cual se dictan normas para el cumplimiento del contenido del título III de la parte 4 del libro 1 del decreto-ley 2811 de 1974 y los títulos I, III y XI de la ley 9 de 1979, en cuanto a residuos especiales. Constituida por 144 artículos distribuidos en 9 capítulos en los cuales se reglamenta el manejo, transporte y disposición de residuos peligrosos. (Resolución 2309, 1986)
Convenio de Basilea	Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. En el anexo i se listan los residuos o desechos peligrosos que hay que controlar y que luego son retomados en el decreto 4741 del 2005. (Convenio de Basilea, 1992)
Ley 99 de 1993	Firmada el 22 de diciembre de 1992, por la cual se crea el ministerio de medio ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental –SINA- y se dictan otras disposiciones, está conformada por 118 artículos en los cuales se especifican los principios que debe seguir la política ambiental colombiana, se crea el ministerio de medio ambiente y las car y se dictan las funciones de los mismos, además se crea licencia ambiental definida como la autorización que otorga la autoridad ambiental para la ejecución de un proyecto que de acuerdo con la ley o los reglamentos pueda producir deterioro grave de los recursos naturales renovables o del medio ambiente, la cual sujeta al beneficiario de esta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación, y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizado. (Ley 99, 1993)

Decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005	El presente decreto establece los parámetros, normas y reglas que se deben cumplir para la prevención y manejo de residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Como principal objetivo, este decreto fomenta la prevención de la generación de desechos peligrosos y regula el manejo de estos buscando proteger la salud humana y el ambiente. Más adelante entraremos en detalle con respecto a este decreto. (Decreto 4741, 2005)
Resolución 1402 del 17 de julio del 2006	Se desarrolla parcialmente 4741 del 30 de diciembre del 2005, en materia de residuos peligrosos. Artículo 2 ninguna persona natural o jurídica puede introducir al territorio nacional desechos tóxicos. Artículo 3 ninguna persona natural o jurídica puede introducir al territorio nacional residuos o desechos peligrosos si no cumple con lo consagrado en el convenio de Basilea, ley 253 de 1996, ley 430 de 1998, ley 99 de 1993 y sus disposiciones reglamentarias. En consecuencia, cualquier movimiento transfronterizo de residuos o desechos peligrosos deberá dar cumplimiento a lo establecido en las mencionadas disposiciones. (resolución 1402, 2006)
Resolución no 0062 IDEAM	Mediante esta resolución se adoptan protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos. Artículo primero: explica los protocolos para el muestreo y análisis de las características de peligrosidad de los residuos o desechos peligrosos. En esta resolución se explican los protocolos metodológicos para los residuos peligrosos según sus características de peligrosidad. Haremos énfasis en los protocolos metodológicos para residuos peligrosos con características toxicas lo cual corresponde a lixiviados. Protocolos metodológicos para toxicidad Para la evaluación de la toxicidad de un residuo, se han considerado seis pruebas diferentes: TCLP, SPLP, bioluminiscencia bacterial, quimioluminiscencia bacterial, toxicidad aguda para daphnia y ensayo de inhibición de algas. Se presentan los protocolos seleccionados para la determinación características, cuya evaluación permitirá la catalogación de un residuo como tóxico. Hacemos énfasis únicamente en la prueba TCLP ya que es la que se utiliza en la industria de los hidrocarburos para determinar si los cortes de perforación contienen componentes que se pueden lixiviar hacia el suelo. (Resolución nº0062, 2007)
Ley 1252 del 27 de noviembre del 2008	Se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. Artículo 4 queda prohibida la introducción, importación o tráfico de residuos o desechos peligrosos al territorio nacional por parte de cualquier persona jurídica o natural, de carácter público o privado. De igual forma será prohibida la disposición final de residuos peligrosos

Protocolo de
Lousiana regla 29
b

en rellenos sanitarios que no cumplan con la capacidad o condiciones físicas y técnicas adecuadas para tal fin. (Ley 1252, 2008)

En Colombia se cumplen los requerimientos estipulados en este protocolo. Esta es una norma que tiene como objetivo regular las actividades industriales del petróleo con el fin de evitar la contaminación del medio ambiente y de los recursos naturales. En ella se establecen los límites permisibles para distintos parámetros que en concentraciones por encima de las establecidas por la presente norma pueden tener impactos negativos sobre el medio ambiente.

En la tabla 2, se establecen los límites permisibles de los parámetros de metales e hidrocarburos totales de petróleo (TPH), para la estabilización de lodos y suelos contaminados. (Regla 29b,1999).

Tabla 2.

Límites permisibles de los diferentes parámetros basados en el protocolo de Lousiana 29b

Parámetros	Valor
pH.	6.0-9.0
Conductividad eléctrica	< 4.0 ohm/cm
Relación de absorción de sodio	< 12.0
Porcentaje de sodio intercambiable	< 15.0%
Grasas y aceites	≤ 1.0%
Arsénico	10.0 mg/kg
Bario	20000 mg/kg
Cadmio	10.0 mg/kg
Plomo	500.0 mg/kg
Mercurio	500.0 mg/kg
Selenio	10.0 mg/kg
Plata	200.0 mg/kg
Zinc	500.0 mg/kg

Nota: En la tabla 2 se muestran los límites permisibles de los parámetros de metales e hidrocarburos totales de petróleo. Tomado de (Regla 29b,1999)

Decreto 1076 del
2015

Por el cual se expide el decreto único y reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible, en su artículo 2.2.6.2.3.6. De los anexos, se toman los anexos I, II y III del decreto 4741 del 2005 en los cuales se listan los residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades, corrientes de residuos y las características de peligrosidad de los residuos peligrosos. (Decreto 1076, 2015).

Nota: En la tabla 1 se enuncian las leyes colombianas que regulan el manejo y la disposición residuos peligrosos y se explica brevemente sobre que habla cada una de ellas.

2.1. Entrada en detalle del decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005

El presente decreto establece los parámetros, normas y reglas que se deben cumplir para la prevención y manejo de residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Como principal objetivo, este decreto fomenta la prevención de la generación de desechos peligrosos y regula el manejo de estos buscando proteger la salud humana y el ambiente (Decreto 4741, 2005).

En este decreto, de acuerdo al capítulo ii los desechos o residuos considerados peligrosos en el marco de la industria petrolera según el anexo i, son los siguientes:

- Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua.
- Desechos que contengan principalmente constituyentes inorgánicos que puedan contener metales o materia orgánica. (Decreto 4741, 2005).

Artículo 5. El generador (empresa que produce los residuos) puede demostrar ante la autoridad ambiental que sus residuos no presentan ninguna característica de peligrosidad y para ello debe realizar la caracterización fisicoquímica de sus residuos. Los análisis de caracterización de peligrosidad son propuestos por la empresa sobre la base del conocimiento de sus residuos ante la autoridad ambiental y esta última determina si se deben hacer análisis adicionales o si estos son los adecuados de acuerdo al residuo. (Decreto 4741, 2005)

Artículo 6. Las características que hacen que un residuo sea considerado peligroso son las siguientes: corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas y radiactivas. (Decreto 4741, 2005).

Residuo peligroso por ser corrosivo: El carácter corrosivo de un residuo puede causar graves daños en los tejidos vivos con los que este pueda entrar en contacto y en caso de fuga puede dañar gravemente otros materiales. (Decreto 4741, 2005).

Residuo peligroso por ser reactivo: Al mezclarse este tipo de residuos o ponerse en contacto con otros elementos, compuestos, sustancias o residuos tiene las siguientes características:

- Puede producir la generación de gases, vapores y humos tóxicos en cantidades suficientes para causar daños a la salud humana o ambiental cuando se mezcla con agua.
- Estar compuesto por cianuros, sulfuros, peróxidos orgánicos que al reaccionar liberen gases, vapores o humos que en cantidades alarmantes pongan en riesgo la salud humana o del ambiente.
- Explosión bajo la acción de un fuerte estímulo inicial o de calor en ambientes confinados
- Dar lugar a reacciones exotérmicas o endotérmicas al ponerse en contacto con el aire, agua o cualquier otro elemento o sustancia.
- Provocar o favorecer la combustión. (Decreto 4741, 2005).

Residuo peligroso por ser explosivo: Un residuo es explosivo cuando en estado sólido o líquido de manera espontánea, por reacción química, desprende gases a una temperatura presión y velocidad tales que pueda causar daño a la salud humana y del ambiente, además puede:

- Formar mezclas potencialmente explosivas con el agua.
- Producir fácilmente reacción o descomposición detonante o explosiva a condiciones de presión y temperatura ambientales. (Decreto 4741, 2005).

Residuo peligroso por ser inflamable: Se da cuando en presencia de una fuente de ignición, el residuo puede arder bajo ciertas condiciones de presión y temperatura.

Residuo peligroso por ser infeccioso: Este tipo de residuos contiene agentes patógenos como bacterias, parásitos, virus, hongos entre otros agentes que en suficientes concentraciones pueden causar enfermedades en los humanos y animales. (Decreto 4741, 2005).

Residuo peligroso por ser radiactivo: Un residuo es radioactivo cuando contiene materiales radiactivos con una actividad radiactiva por unidad de masa superior a 70kbq/kg (kilobacterilos por kilogramo) o 2nci/g (nanocuries/gramo) capaces de emitir en forma directa o indirecta radiaciones. (Decreto 4741, 2005).

Residuo peligroso por ser toxico: Es aquel que puede causar efectos biológicos indeseables, produciendo daño a la salud humana y ambiental. Se considera un residuo toxico a aquel que al realizársele una prueba de lixiviación para características de toxicidad (TCLP), contiene uno o más de las sustancias de la siguiente tabla en concentraciones superiores a los niveles máximos permisibles en el lixiviado. (Decreto 4741, 2005).

La tabla 3 establece los niveles máximos permitidos de lixiviación de contaminantes después de la prueba TCLP.

Tabla 3.

Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP.

Contaminante	Numero de cas	Nivel máximo permisible en el lixiviado (mg/l)
Arsénico	7440-38-2	5.0
Bario	7440-39-3	100.0
Benceno	71-43-2	0.5
Cadmio	7440-43-9	1.0
Tetracloruro de carbono	56-23-5	0.5
Clordano	57-74-9	0.03
Clorobenceno	108-90-7	100.0
Cloroformo	67-66-3	6.0
Cromo	7440-47-3	5.0
O – cresol	95-48-7	200.0

M-cresol	108-39-4	200.0
P-cresol	106-44-5	200.0
Cresol		200.0
2,4-d	94-75-7	10.0
1,4-diclorobenceno	106-46-7	7.5
1,2-dicloroetano	107-06-2	0.5
1,1-dicloroetileno	75-35-4	0.7
2,4-dinitrotolueno	121-14-2	0.13
Endrín	72-20-8	0.02
Heptacloro (y sus epóxidos)	76-44-8	0.008
Hexaclorobenceno	118-74-1	0.13
Hexaclorobuadieno	87-68-3	0.5
Hexacloroetano	67-72-1	3.0
Plomo	7439-92-1	5.0
Lindano	58-89-9	0.4
Mercurio	7439-97-6	0.2
Metoxiclor	72-43-5	10.0
Metil etil cetona	78-94-3	200.0
Nitrobenceno	98-95-3	2.0
Pentaclorofenol	87-86-5	100.0
Piridina	110-86-1	5.0
Selenio	7782-49-2	1.0
Plata	7440-22-4	5.0
Tetracloroetileno	127-18-4	0.7
Toxafeno	8001-35-2	0.5
Tricloroetileno	79-01-6	0.5
2,4,5-triclorofenol	95-95-4	400.0
2,4,6-triclorofenol	88-06-2	2.0
2,4,5-tp (silvex)	93-72-1	1.0
Cloruro de vinilo	75-01-4	0.2

Nota: En la tabla 3 se muestran los límites permisibles de lixiviados en los residuos peligrosos y el número de cas que identifica a cada contaminante, el número de cas es una identificación numérica única para compuestos químicos. Tomado de (Decreto 4741, 2005)

Artículo 8: El IDEAM es quien define los protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos peligrosos en el país. La caracterización de los residuos debe efectuarse en laboratorios acreditados y la empresa que genera los residuos debe

actualizar la caracterización de sus residuos en caso de haberse efectuado cambios en el proceso que genera el residuo en cuestión. (Decreto 4741, 2005).

Artículo 9: Los residuos o desechos peligrosos se deben envasar, rotular, etiquetar y transportar en armonía con lo establecido en el decreto 1609 de 2002 o por aquella norma que la modifique o sustituya. (Decreto 4741, 2005).

Obligaciones y responsabilidades del generador.

Con base en el capítulo III del presente decreto se estipula que:

Artículo 10: El generador en el marco de la gestión integral de los residuos debe

- Garantizar la gestión y manejo integral de los residuos o desechos peligrosos que genera.
- Elaborar un plan de gestión integral de los residuos que ayude a prevenir, la generación de residuos y minimizar la peligrosidad de estos. El plan no debe ser presentado ante la autoridad ambiental, pero debe estar disponible para cuando esta realice actividades de control y seguimiento ambiental.
- Identificar las características de peligrosidad de los residuos.
- Garantizar que el envasado o empacado, embalado y etiquetado de sus residuos se realice conforme a la normatividad vigente.
- Capacitar al personal encargado del manejo de residuos en sus instalaciones con el fin de divulgar el riesgo que estos representan para la salud y el ambiente. Además, debe brindar el equipo necesario para el manejo de los residuos, así como los elementos de protección personal necesarios para ello.
- Contar con un plan de contingencia para atender cualquier eventualidad que se pueda presentar.

- Conservar las certificaciones de almacenamiento, aprovechamiento, tratamiento o disposición que emitan los receptores (empresas encargadas del almacenamiento tratamiento y disposición de residuos) hasta por un tiempo de 5 años.
- Tomar medidas preventivas antes del cierre de actividades o clausura, para evitar cualquier eventualidad que resulte en contaminación y riesgo a la salud humana y ambiental.
- Contratar los servicios de almacenamiento, aprovechamiento, recuperación, tratamiento y disposición final con instalaciones que cuenten con licencias, permisos, autorizaciones, o demás instrumentos de manejo y control ambiental necesario según la normatividad ambiental vigente. (Decreto 4741, 2005).

Artículo 12: La responsabilidad del generador subsiste hasta que el residuo o desecho peligroso sea aprovechado como insumo o dispuesto con carácter definitivo. (Decreto 4741, 2005).

Artículo 17: obligaciones del receptor. Las instalaciones cuyo objeto sea prestar servicios de almacenamiento, aprovechamiento, valorización, tratamiento y/o disposición final de residuos peligrosos deberán:

- Tramitar y obtener licencias, permisos y autorizaciones de carácter ambiental que haga lugar.
- Dar cumplimiento a la normatividad de transporte, salud ocupacional y seguridad industrial que haya lugar.
- Brindar un manejo seguro y ambientalmente adecuado de los residuos o desechos recibidos para realizar una o varias de las etapas de manejo, de acuerdo con la normatividad vigente.
- Contar con el personal que tenga la formación y capacitación adecuada para el manejo de residuos o desechos peligrosos.

- Contar con un plan de contingencia actualizado para atender cualquier eventualidad y contar con el personal capacitado para su implementación.
- Tomar medidas preventivas o de control previas al cese, cierre, clausura o desmantelamiento de su actividad con el fin de evitar cualquier episodio de contaminación que pueda representar un riesgo a la salud y al ambiente, relacionado con los residuos o desechos peligrosos. (Decreto 4741, 2005).

Artículo 18: responsabilidad del receptor: El receptor del residuo o desecho peligroso asumirá la responsabilidad integral del generador, una vez o reciba del transportador y haya efectuado o comprobado el aprovechamiento o disposición final del mismo. (Decreto 4741, 2005).

Artículo 19: Aquellas personas que resulten responsables de la contaminación de un sitio por efecto de un manejo o una gestión inadecuada de residuos o desechos peligrosos estarán obligadas entre otros, a diagnosticar, remediar y reparar el daño causado a la salud y el ambiente, conforme las disposiciones legales vigentes. (Decreto 4741, 2005).

En Colombia se aplica el método 1311 para determinar la característica de toxicidad por lixiviación. En el presente decreto se describe este método el cual será explicado más adelante en el desarrollo de este trabajo de investigación. (decreto 4741, 2005).

3. Método para determinar la característica de toxicidad por lixiviación (test TCLP - toxicity characteristics leaching procedure).

3.1. Ámbito y aplicabilidad.

Este procedimiento se realiza para determinar la característica de toxicidad por lixiviación de un residuo líquido, sólido o una mezcla de estas fases, a partir de un análisis practicado a una muestra de lixiviado o extracto del mismo obtenido bajo ciertas condiciones estándares. El procedimiento consiste en determinar la movilidad en el residuo de determinados constituyentes tóxicos, sean estos elementos o compuestos químicos, tanto de origen orgánico como inorgánico.

No será necesario la realización de este test en las siguientes situaciones. (EPA method 1311, 1992).

- Si se demuestra, a través de un análisis total practicado al residuo, la ausencia en el de los constituyentes tóxicos o, habiéndose detectado la presencia de estos, sus concentraciones son tan bajas que nunca podrían igualar o superar las máximas permisibles establecidas por la normativa sobre residuos peligrosos.
- Si se demuestra, a través de un análisis practicado a cualquiera de las fracciones líquidas del residuo, que los contenidos de uno o más de los constituyentes tóxicos son tan altos que podrían igualar o superar las concentraciones máximas permisibles establecidas en la normativa sobre residuos peligrosos. En este caso no se requerirán análisis adicionales y el residuo será considerado peligroso. (EPA method 1311, 1992).

3.2. Resumen del método.

Para realizar la prueba TCLP, se debe hacer un análisis del origen del residuo para identificar los posibles componentes tóxicos que este pudiera contener y descartar de antemano la presencia de algunos contaminantes en el residuo. Si no es posible saber los posibles constituyentes tóxicos que puedan estar presentes en el residuo, entonces se deberá realizar un análisis de laboratorio para determinar cualitativa y cuantitativamente los constituyentes tóxicos del residuo. Se podrán utilizar técnicas laboratorio tales como: cromatografía, absorción atómica, fluorescencia de rayos x, etc. (EPA method 1311, 1992).

En caso de que el análisis antes mencionado demuestre que el residuo contiene alguno de los constituyentes tóxicos indicados en la normativa sobre residuos peligrosos, en cantidades tales que, si estos difundieran totalmente lixiviado o extracto TCLP podría igualar o superar alguno de los máximos permisibles establecidos en la misma normativa sobre residuos peligrosos. Será necesaria la aplicación de la prueba TCLP. (EPA method 1311, 1992).

Para residuos sólidos como los cortes de perforación se debe proceder a realizar, una separación de las fases líquida y sólida. La fase líquida se almacena para un análisis posterior y la fase sólida se somete a una reducción de tamaño si es necesario y luego a un proceso de extracción. Dependiendo de la alcalinidad de la fase sólida, se pone en contacto con una solución ácida o básica (solución lixivante) durante un determinado periodo de tiempo y bajo condiciones de agitación. La cantidad empleada de solución lixivante equivale a 20 veces el peso de la muestra sólida. Luego del proceso de extracción la solución que resulta se pasa a través de un filtro de tamaño de poros 0,6 a 0,8 micrones (μm). La solución resultante es el lixiviado de la prueba TCLP y los sólidos filtrados son descartados. (EPA method 1311, 1992).

Si la fase líquida del residuo y la solución resultantes de la extracción de la fase sólida del mismo residuo son compatibles (es decir no presentan problemas de miscibilidad al mezclarse) estos líquidos se pueden mezclar y analizar en conjunto. La mezcla resultante formará el lixiviado de la prueba TCLP. (epa method 1311, 1992).

Si no hay compatibilidad, el análisis de los líquidos se deberá realizar por separado y los resultados se promediarán con el objetivo de obtener una concentración promedio que represente al conjunto. (epa method 1311, 1992).

3.3. Resultados.

Por este método se presenta el proceso de obtención del extracto TCLP, se deben comparar las concentraciones de los constituyentes en el extracto TCLP con los niveles identificados en la regulación apropiada. (EPA method 1311, 1992).

Se considera que el residuo es peligroso si el lixiviado del TCLP contiene componentes tóxicos en concentraciones que iguales o superen los valores permitidos en la normatividad. (EPA method 1311, 1992).

4. Generalidades de las operaciones de perforación.

4.1. Lodos de perforación.

El lodo de perforación es un fluido que se bombea al pozo productor con el fin de cumplir ciertas funciones para que la operación de perforación se de en óptimas condiciones. Este fluido es preparado con una variedad de aditivos que le dan ciertas características físicas y químicas al lodo y modifican propiedades como la densidad, viscosidad, gravedad específica, gravedad API, pH entre otras propiedades del lodo. Las funciones que debe realizar un lodo de perforación son:

- Controlar la presión de la formación.
- Proporcionar estabilidad al pozo.
- Transportar y suspender recortes de perforación.
- Lubricar y enfriar la broca.
- Transmitir energía hidráulica a la sarta y a la broca.
- Capacidad flotante para reducir el peso de las herramientas durante la perforación.
- Formar una torta en las paredes del pozo para evitar el paso de fluido desde el hueco hacia formaciones permeables.
- Evitar daños de permeabilidad en la zona de interés.
- Permitir la toma de registros de pozo para evaluar formaciones sin alterar la información.

(Forero, 2016, p,3).

4.1.2. Clasificación de los lodos de perforación. Los lodos de perforación se pueden clasificar de la siguiente forma:

4.1.2.1. Lodos base agua. Son los lodos de perforación más utilizados en la industria debido a que son más económicos de mantener. Se componen por agua fresca o salada, bentonita y algunos aditivos químicos utilizados para darle algunas características específicas a la reología del lodo dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el pozo. (Lizarazo y leal,2011).

4.1.2.2. Lodos base aceite. Este tipo de lodo se usa cuando se perforan arcillas para mejorar la estabilidad del pozo y evitar la hidratación de las arcillas. Son usados también para la perforación de pozos desviados por su carácter lubricante. Este tipo de lodos son resistentes a la anhidrita, sal y gases ácidos como el CO_2 y H_2S (Lizarazo y leal,2011).

4.1.2.3. Lodos sintéticos. Son fluidos similares a los fluidos base aceite, con la diferencia que en estos el fluido base es un material sintético en vez de aceite. Este tipo de lodos son más amigables con el medio ambiente que los fluidos base aceite, pero tienen un costo más elevado y además son poco resistentes a altas temperaturas. Los materiales sintéticos más usados son las olefinas y los esteres (Lizarazo y leal,2011).

4.2. Cortes de perforación.

Los cortes de perforación son pedazos de roca que se desprenden de la formación por acción de las fuerzas de compresión y rotación del taladro al interior del pozo; estos pedazos a medida que ascienden a la superficie disminuyen en tamaño debido a la abrasión con otras partículas.

4.2.1. Composición de los cortes de perforación. La composición de los cortes de perforación cambia dependiendo de la formación geológica que se esté perforando y del tipo de lodo que se esté utilizando. Los cortes de perforación al estar en contacto directo con el lodo adquieren ciertas características del lodo y es por esta razón es que se torna complicado el manejo y la disposición de ellos al medio ambiente.

Debido a que la utilización de un tipo de fluido durante las operaciones de perforación afecta directamente al corte de perforación, se deben implementar técnicas distintas para tratar los cortes de perforación dependiendo del tipo de fluido utilizado. Cuando en la perforación se usan fluidos base aceite, los cortes generados a medida que fluyen hacia superficie con el lodo, son cubiertos por una capa de aceite que se ubica en la superficie del corte, lo cual no sucede cuando en lugar de esto se utilizan fluidos base agua. Además, cuando se entra en contacto con formaciones productoras de hidrocarburos, los cortes de perforación también se impregnan con los hidrocarburos de la zona productora.

4.2.2. Clasificación de los cortes de perforación. Los cortes de perforación se clasifican según el tipo de lodo utilizado durante la perforación.

4.2.2.1. Cortes impregnados con lodos base agua. Los lodos base agua se caracterizan por ser un desecho fácil de manejar y económico, en estos fluidos se debe controlar la cantidad de cloruros, el pH y los sólidos totales en el agua para su descarga. Este tipo de cortes no genera un peligro para el medio ambiente ya que sus características fisicoquímicas generalmente no sobrepasan los límites establecidos por las normas ambientales (Lizarazo y leal, 2011).

4.2.2.2. Cortes impregnados con lodos base aceite. Los fluidos base aceite son los que requieren mayor cuidado debido al impacto ambiental que estos generan. Los cortes impregnados con fluidos base aceite pueden tener características físicas peligrosas para el medio en el cual son depositados tales como el alto contenido de hidrocarburos y metales pesados (Lizarazo y leal, 2011).

4.2.3. Indicadores de peligrosidad en los cortes de perforación. Los impactos ambientales generados por los cortes de perforación podemos identificarlos de acuerdo a los efectos que tienen los componentes contaminantes del corte sobre el medio ambiente. Los cortes de perforación base agua no representan un peligro considerable ya que su principal componente es el agua, mientras que los lodos base aceite si pueden causar un daño considerable (Alarcón, 2014). Entre los principales contaminantes que podemos encontrar en los cortes de perforación están: aceite en forma libre, diésel en forma libre, cadmio, cromo, mercurio, plomo y algunos contaminantes inorgánicos tóxicos.

4.2.3.1. Aceite en forma libre. La contaminación por este agente en los cortes de perforación se puede dar por la filtración o lixiviación del aceite hacia el suelo causada por descuido en el manejo de los residuos o accidentalidad durante el transporte y la disposición de los cortes. El efecto que tiene este componente en caso de accidentalidad sobre cuerpos de agua es que entorpece la transferencia de oxígeno entre el agua y el aire desoxigenando el medio acuático y provocando la muerte de especies acuáticas. En el suelo la filtración o lixiviación de aceite libre hace más difícil la aireación del suelo causando muerte de especies vegetales (Alarcón, 2014). Entre los componentes contaminantes que podemos encontrar en el aceite en forma libre tenemos: naftaleno, fenantreno, fenol, zinc, plomo, cromo y cobre.

4.2.3.2. Diésel en forma libre. El uso de aceite diésel produce hidrocarburos aromáticos polinucleares los cuales se caracterizan por ser los constituyentes más tóxicos del petróleo, la exposición a este tipo de hidrocarburos puede tener efectos cancerígenos. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos pueden ser introducidos al ambiente durante el uso del aceite diésel en el fluido de perforación (Alarcón, 2014). Podemos encontrar los contaminantes: benceno, benzo(a)pireno, metilnafteno, metilfenantreno y otras formas alquiladas.

4.2.3.3. Metales pesados. Metales pesados como el cobre, selenio, cadmio, plomo, entre otros forman parte de los fluidos y de los recortes de perforación. Pueden ser encontrados en los aditivos usados para fabricar el lodo de perforación o también pueden ser incorporados a los recortes por la presencia de estos en las formaciones atravesadas durante la perforación de pozos. La exposición a metales pesados puede producir enfermedades como la gastroenteritis o náuseas en periodos cortos de exposición y en largos periodos puede tener efectos como envenenamiento crónico por la acumulación de algunos de los metales pesados en el cuerpo. La incorporación de metales pesados al suelo o al agua puede ser causada durante el transporte y disposición de los residuos contaminados (Alarcón, 2014).

4.2.4. Manejo de los cortes de perforación. El manejo de los cortes comienza con la recolección de estos a través de los mecanismos de control de sólidos del pozo. Una vez los sólidos son separados de la parte líquida del lodo de perforación estos son recolectados y llevados a un área de almacenamiento en la cual se toma una muestra de representativa de los cortes y se estudia para determinar si el corte cumple con las condiciones exigidas por la normatividad vigente en cada país con respecto al análisis TCLP para su posterior disposición, esto aplica tanto para cortes de

perforación impregnados con lodos base aceite como para cortes de perforación impregnados con lodo base agua.

Los cortes de perforación impregnados con lodos base agua cuando son extraídos de los mecanismos de control de sólidos se acumulan en pilas y si cumplen con el TCLP se espera para su disposición final.

Los cortes de perforación impregnados con lodos base aceite de la misma forma después de pasar por el sistema de control de sólidos se deben almacenar y analizar para en función de este análisis determinar el tratamiento que se le va a aplicar para cumplir con la normatividad y poder hacer la disposición final.

4.3. Sistemas de control de sólidos.

Los sistemas de control de sólidos son dispositivos que reciben la corriente de lodo que viene del pozo y separan la parte líquida de la sólida a través de procesos físicos, dejando a el corte lo más seco posible. Como sistemas de control de sólidos podemos encontrar los siguientes:

4.3.1. Unidad de secado de cortes. Este tipo de unidades son utilizadas para el secado de cortes de perforación base aceite con el fin de quitar la mayor cantidad de fluido de los cortes y recuperarlo para recircularlo al sistema de lodo evitando gastos innecesarios en la preparación de más lodo de perforación.

La unidad está conformada por una centrifuga secadora, el material que entra a la centrifuga secadora es material proveniente de las descargas del equipo de control de sólidos, la línea de descarga de la centrifuga se reciben en un tanque que tiene dos compartimientos, uno para los

recortes secos y el otro para el lodo recuperado del proceso el cual luego es procesado por una centrífuga LGS que lo limpia de impurezas para poder recircularlo al sistema de lodo (Ramírez, Rubio y toro, 2006).

4.3.2. Zarandas. Las zarandas son parte esencial de los equipos de control de solido de un taladro y es de los dispositivos más importantes para la de prevención contra la acumulación de sólidos en el lodo por ser el primer equipo al cual entra la corriente de lodo que sale del pozo.

Las zarandas hacen la separación de partículas basada en el tamaño de estas (tamizado). Son mallas separadoras vibratorias utilizadas para remover los cortes de perforación provenientes del lodo, en especial las partículas sólidas más grandes. Desde el inicio de la perforación este equipo debe funcionar con su máxima eficiencia para poder lograr la máxima remoción de solidos limpios con una perdida mínima del fluido.

Este equipo asegura la eficiencia de todo el mecanismo de control de sólidos y por esto es de gran importancia que no opere con mallas rotas debido puesto que los equipos que lo preceden están diseñados para manejar partículas de tamaños más pequeños (MI SWACO, sf).

A continuación, en la figura 1, se muestra una representación gráfica del equipo.

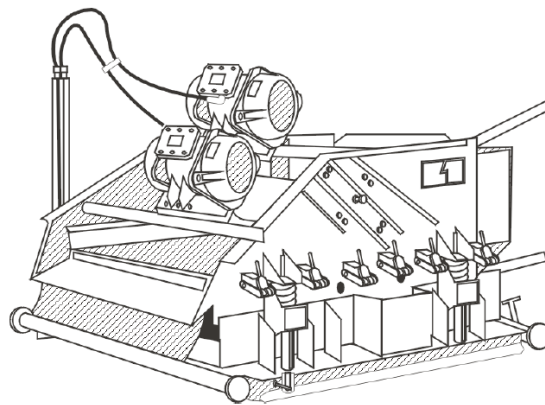


Figura 1. Zarandas. Tomado del manual de control de solidos (MI SWACO, sf).

4.3.2.1. Ventajas de zarandas

- Simples de operar
- Disponibilidad
- Si el tamizado es conocido el punto de corte es predecible.
- Capaz de procesar el volumen total de lodo circulado.
- Fácil de inspeccionar.
- Los sólidos pueden ser removidos antes de cualquier degradación mecánica

4.3.2.2. Desventajas

- Son costosas (compra y operación)
- Su montaje necesita mucho espacio
- La inspección de mallas del fondo en zarandas dobles es difícil de inspeccionar
- Produce sólidos húmedos en su descarga (MI SWACO, sf).

4.3.3. Hidrociclones. En los hidrociclones la separación se logra mediante la generación de fuerzas centrífugas, la corriente de alimentación forma un torbellino primario a lo largo de la superficie interior de la pared de las partes cilíndrica y cónica, dirigiéndose al exterior a través del vórtice cónico. Al ser este estrecho, solamente una parte de la corriente es evacuada como flujo inferior (underflow), transportando las partículas gruesas o inclusive todos los sólidos con ella. La mayoría del líquido (que ha sido limpiado por la sedimentación de los sólidos en el torbellino primario, o bien que transporta las partículas finas sobrantes con el), es forzado a abandonar el ciclón a través de la tobera del flujo superior (overflow) formando un torbellino secundario ascendente alrededor del núcleo de la carcasa. En el interior del núcleo se crea una depresión, que

recoge todo el aire que ha sido transportado como burbujas o disuelto en el agua de alimentación. Debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario, las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficiente separación secundaria. Las partículas finas rechazadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla formada por el vórtice del cono. Por consiguiente, la separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final sería determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior (MI SWACO, sf).

A continuación, en la figura 2 y 3, se muestra una representación gráfica del equipo.

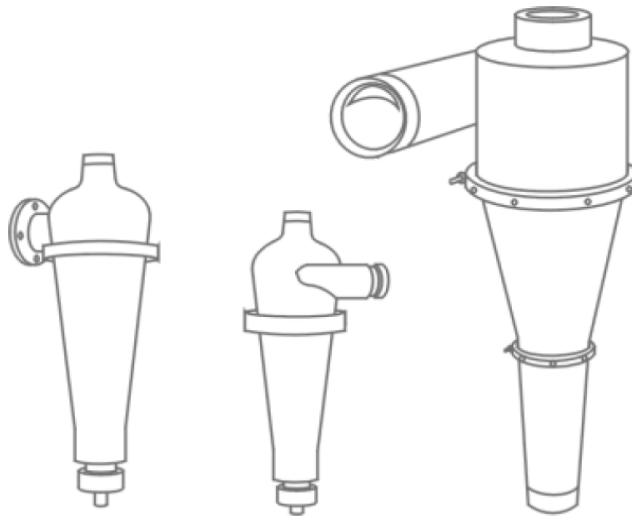


Figura 2. Hidrociclón. Tomado del manual de control de solidos (MI SWACO, sf).

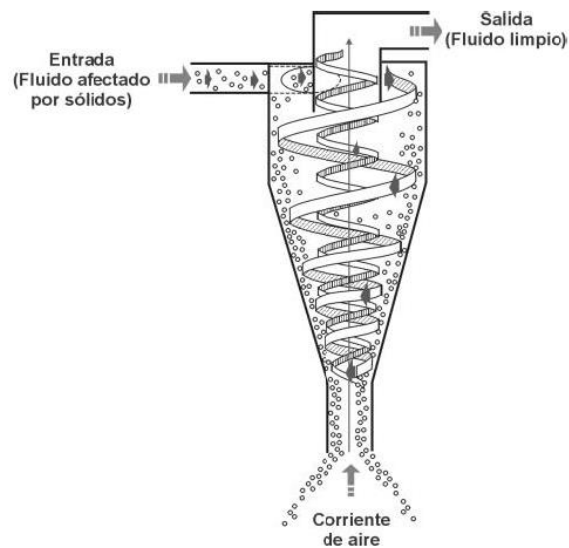


Figura 3. Funcionamiento interno de un hidrociclón. Tomado del manual de control de sólidos (MI SWACO, sf).

4.3.3.1 Ventajas de los hidrociclones.

- Al comparar con otras tecnologías, la mayor ventaja de un hidrociclón es que no tiene partes móviles. Por lo tanto, tiene una estructura simple y es fácil de construir, usar y mantener.
- Gran volumen y gran capacidad.
- Alta eficiencia de la filtración y fuerte capacidad de trabajo.
- Versatilidad: Se pueden utilizar en procesos donde se requiera clarificar, clasificar, concentrar, y también en procesos donde se requiere separar gases de líquidos.
- Son unidades pequeñas, lo que permite ahorrar espacio.
- Esfuerzos cortantes altos, lo que evita la aglomeración (MI SWACO, sf).

4.3.3.2 Desventajas.

- Son inflexibles, esto significa que los hidrociclones son rígidos en su forma y construcción lo que permite poca posibilidad de variación del diseño, esto es debido a que los materiales usados para la construcción de estos equipos son materiales altamente rígidos, metálicos y con muy poca flexibilidad.
- La capacidad y la eficiencia se relacionan de manera inversa, es decir se logra aumentar una, pero se disminuye la otra.
- Su elevado consumo de energía también es una desventaja, esto se debe a que estos equipos son de grandes dimensiones o los ocupan con grandes cargas de material y para generar el movimiento necesario, se necesita una fuerte ingesta de energía, la cual es principalmente a través de la electricidad.
- El alto grado de desgaste que tienen los hidrociclones se debe a que se utilizan cargas pesadas que deterioran el material con el cual está hecho el equipo, además que se le agrega agua lo cual, pese a que utilicen metal anticorrosivo, lo corroe de alguna forma.
- Pese a que el problema por taponamiento no es común, suele presentarse en algunos casos.
- A altas concentraciones, el hecho de que presenten esfuerzos cortantes altos se convierte en una desventaja, ya que existe la imposibilidad de usar floculantes (MI SWACO, sf).

4.3.4. Desarenadores. Son un tipo de hidrociclón usado para reducir el contenido de arena en los lodos de perforación. Tienen un diámetro interno que varía entre 10 y 12 pulgadas, ayudan a disminuir la frecuencia con la que se tiene que reparar algunas partes de las bombas que se ven afectadas por el efecto de la abrasión de las partículas sólidas. Este dispositivo puede estar formado

por uno o más hidrociclones de acuerdo al caudal máximo que se va a usar durante la perforación del hueco (MI SWACO, sf).

A continuación, en la figura 4, se muestra una representación gráfica del equipo.

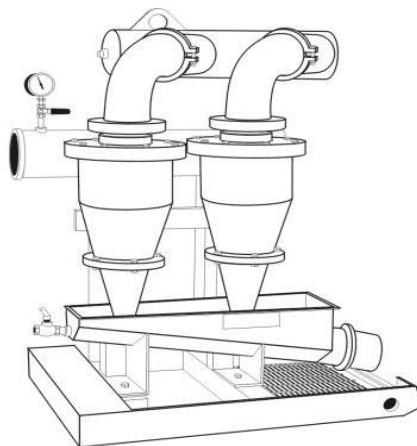


Figura 4. Desarenadores. Tomado del manual de control de solidos (MI SWACO, sf).

4.3.5. Desarcilladores. Los desarcilladores, son dispositivos de control de solidos que utilizan hidrociclones más pequeños de 4 o 5 pulgadas de diámetro interno en comparación con los desarenadores. Se caracterizan por remover partículas sólidas más pequeñas entre 2 y 74 micrones, lo cual los convierte en dispositivos muy importantes para evitar la abrasión causada por dichas partículas. El principio de funcionamiento de esta unidad es el mismo que el de los desarenadores, la separación de los sólidos se produce por la fuerza centrífuga generada en el equipo la cual empuja las partículas más pesadas hacia abajo en forma de espiral hasta que estas son descargadas. El líquido fluye hacia arriba y al centro hasta que sale por la parte superior del equipo (MI SWACO, sf).

A continuación, en la figura 5, se muestra una representación gráfica del equipo.

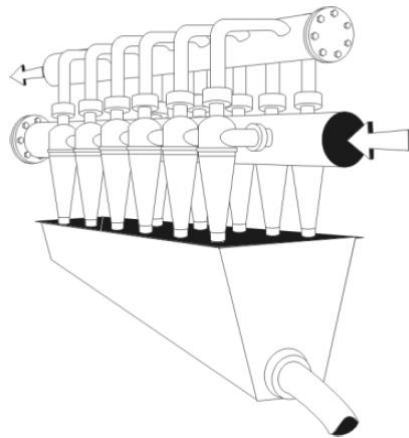


Figura 5. Desarcilladores. Tomado del manual de control de solidos (MI SWACO, sf).

4.3.6. Centrifugas de decantación. Una centrífuga de decantación es un equipo de control de sólidos que remueve sólidos por centrifugación. Está conformada por un tambor o tazón (bowl) de acero inoxidable y un transportador o tornillo helicoidal con doble conexión (screw conveyor) que gira en la misma dirección que el tambor, pero a una velocidad ligeramente menor.

Todas las centrífugas tienen dos descargas: una pastosa por la parte menos ancha del tambor y una líquida por la parte más ancha, y casi todas tienen:

- Boquillas de descarga que evitan la acumulación de sólidos en la cubierta recolectora
- Discos reguladores o medias luna que controlan la descarga líquida.

El fluido puede entrar a la centrífuga por la parte más ancha o menos ancha del tambor rotatorio y es descargado a cierta distancia de la entrada. Este tambor gira a una velocidad controlada por una caja de engranaje, generando una fuerza centrífuga en su interior. El transportador, que se encuentra en el interior del tambor, gira en la misma dirección del tambor, pero a una velocidad ligeramente menor. La diferencia de velocidad entre el tambor y el transportador facilita la separación de los sólidos, los cuales son trasladados por el transportador hacia la parte de menor diámetro del tambor, por donde son descartados. A medida que los sólidos se desplazan hacia la

descarga, se desprenden parcialmente de la fase líquida, la cual regresa hacia la parte de mayor diámetro del tambor y sale por los orificios de descarga (MI SWACO, sf).

A continuación, en la figura 6, se muestra una representación gráfica del equipo.

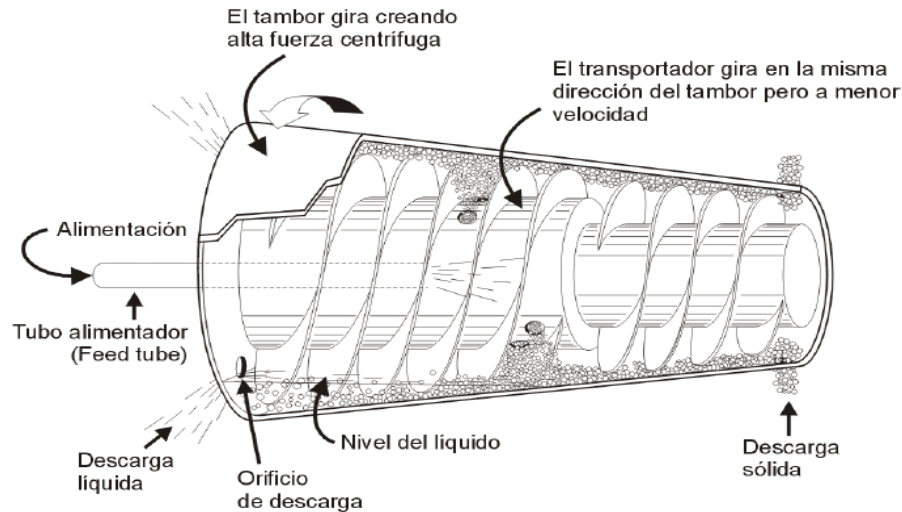


Figura 6. Centrífugas de decantación. Tomado del manual de control de solidos (MI SWACO, sf).

4.3.7. Limpiador de lodos – Mud cleaner. El limpiador de lodos es un dispositivo de separación de dos etapas que combina la implementación de desarcilladores y desarenadores ubicados por encima de una zaranda, estos tres dispositivos están diseñados y montados para funcionar como un solo equipo. Durante el proceso en el limpiador de lodos, se retiran los sólidos perforados aplicando primero los hidrociclones de los desarenadores y desarcilladores al lodo, para luego procesar el desagüe de los conos de los hidrociclones en una zaranda (MI SWACO, sf).

A continuación, en la figura 7, se muestra una representación gráfica del equipo.

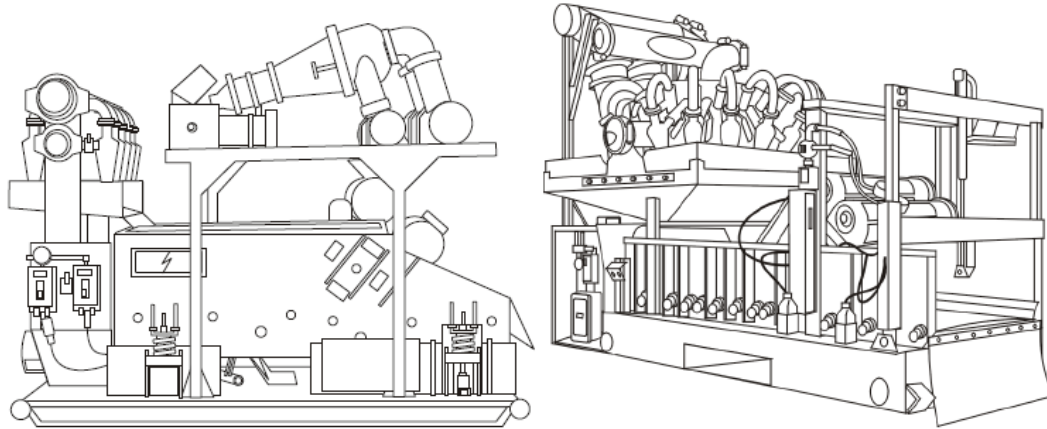


Figura 7. Limpiador de lodos. Tomado del manual de control de solidos (MI SWACO, sf).

4.3.7.1. Ventajas.

- Recuperar la fase liquida costosa
- Recuperar la barita descartada.
- Producir cortes más secos.
- Fácil de operar.
- Es una unidad compacta (MI SWACO, sf).

4.3.7.2. Desventajas.

- Recicla solidos finos a través de las mallas.
- Descarga barita con los cortes.
- Degradación de los sólidos en la descarga y entrega de la bomba centrífuga para su alimentación.
- La separación depende en gran parte de los conos que pueden tener un desempeño pobre.
- Requiere para su operación de una bomba centrífuga (MI SWACO, sf).

5. Tratamiento de los cortes de perforación.

Una vez que el lodo ha pasado por el sistema de control de sólidos y los cortes son separados, estos pasan a una siguiente fase en la cual se le retiran más a fondo los componentes de los cortes de perforación que pueden ser contaminantes para el medio ambiente.

Existen varias técnicas utilizadas para el tratamiento de los cortes de perforación, éstas varían dependiendo del lodo utilizado y de los componentes que pudieron haberse mezclado con los cortes durante la perforación. Generalmente los cortes impregnados con lodos base agua tienen una disposición sencilla puesto que únicamente es necesario separar el lodo de perforación que tienen los cortes y revisar que estos cumplan con el análisis TCLP según el decreto 4741 y la regla 29-B Lousiana, para luego ser dispuestos sin ningún tratamiento posterior. Por otro lado, los cortes impregnados con lodos base aceite si requieren de un tratamiento especial para retirar o neutralizar el componente aceitoso y otros contaminantes presentes en ellos.

El tratamiento de los cortes de perforación se clasifica en: tratamiento in situ y tratamientos ex situ entre los cuales podemos tener diversas técnicas o tecnologías que a su vez se dividen en técnicas físicas químicas y biológicas.

5.1. Tratamiento in situ.

Se conocen como tratamientos in situ a aquellos que permiten tratar el corte en el mismo sitio en donde se genera sin necesidad de excavar ni transportarlo a ningún lugar. Esta particularidad hace de este tipo de tratamiento un poco menos costosos puesto que se evitan los costos de transporte.

Las técnicas in situ no alteran la estructura del suelo, generalmente tiene tiempos de ejecución alto, no garantizan la uniformidad del tratamiento y se torna complicado verificar que el tratamiento ha sido eficiente.

5.2. Tratamiento ex situ.

Son aquellos en los cuales el residuo de perforación es transportado a un lugar en especial para su tratamiento, para ello se requiere la excavación del terreno en caso de que se le vaya a realizar a suelos que han sido dispuestos para el entierro o esparcimiento de cortes de perforación. Estos tratamientos requieren menores tiempos de tratamientos y mayores costos de tratamientos por la necesidad de transportar y excavar el material.

Las técnicas ex situ se caracterizan por alterar la composición estructural del suelo debido a que es necesario realizar la remoción y el transporte del terreno lo cual acarrea costos más altos, generalmente tienen tiempos bajos de ejecución y garantizan la uniformidad y la verificación de la eficacia del tratamiento.

5.3. Tratamientos físicos.

Los tratamientos físicos son aquellas en las cuales se tratan los cortes de perforación a través de procesos físicos. En estas técnicas no se altera la composición de los lodos ni de los cortes debido a que los mecanismos utilizados cumplen únicamente la función de separar la fase líquida de la sólida.

El manejo de los cortes de perforación comienza principalmente con la separación de la parte sólida proveniente del pozo lo cual se realiza a través de los mecanismos de control de sólidos empleados en el pozo. Entre mecanismos de control de sólidos tenemos los definidos anteriormente:

- Unidad de secado de cortes
- Zarandas
- Hidrociclones
- Desarenadores
- Desarcilladores
- Centrifugas
- Limpiadores de lodo

5.4. Tratamientos químicos

5.4.1. Solidificación / Estabilización. Son técnicas de tratamiento de cortes de perforación a través de las cuales se mejoran las características físicas y el manejo de estos y se disminuye el área de contacto con los contaminantes que puedan ser transferidos al lixiviado.

En esta técnica se aplican los dos procesos mencionados, ambos términos “solidificación y estabilización” están estrechamente relacionados, sin embargo, cada uno tiene ciertas características que los diferencian.

- **Solidificación:** En la solidificación se busca la obtención de un residuo de alta integridad estructural, para ello se adicionan materiales cementantes al residuo de perforación para convertirlo en un sólido el cual puede o no tener unión química entre el toxico y el aditivo.
- **Estabilización:** La estabilización permite la obtención de un residuo químicamente más estable. Esta técnica abarca la solidificación y además se le adicionan agentes químicos que reaccionan con el material toxico del corte para convertirlo en uno inerte.

Los cortes son estabilizados con cal viva la cual cumple la función de retirar la humedad y de encapsular el material. Este tratamiento es generalmente usado para cortes base agua y para cortes con pequeñas cantidades de aceite, no es recomendable usar cal viva con cortes base aceite porque a medida que pasa el tiempo se vuelve inestable el proceso y se produce la lixiviación de los hidrocarburos presentes en el corte.

El proceso no retira el hidrocarburo presente en el corte, sino que los estabiliza a través de la adsorción en el producto reaccionado con cal hidratada. Evitando o reduciendo así la liberación de los contaminantes hacia el suelo.

Generalmente los procesos de solidificación / estabilización son muy eficientes cuando se trata de evitar la movilidad de componentes contaminantes inorgánicos, pero al tratarse de componentes orgánicos como los aceites que se derivan de la producción de hidrocarburos, es más difícil que estos componentes generen una interacción fuerte con la matriz lo cual hace que para estos el proceso sea mucho menos eficiente y no puedan retenerse en la matriz de la roca cuando entran en contacto con sustancias apolares como el agua que cae cuando llueve, produciéndose así la lixiviación de estos hacia el suelo.

Para aplicar la solidificación /estabilización, primero se debe realizar un estudio de tratabilidad para determinar si el contaminante es compatible con el tratamiento de lo contrario se debe recurrir a otro tipo de tratamiento. La lixiviación de materiales contaminantes para el medio ambiente depende del tipo de residuo peligroso, y de las condiciones hidrológicas y geoquímicas del lugar en el cual se va a hacer a deposición de los cortes. (Ortiz, 2004).

Los residuos peligrosos que pueden tratarse mediante esta técnica son:

- Bifenilos policlorados (PCB's).
- Compuestos orgánicos volátiles (COV's).
- Metales pesados (plomo, cadmio, níquel y cromo).

En el caso de los compuestos orgánicos volátiles durante la solidificación se pierde hasta un 90% de los COV's debido a la reacción exotérmica presente en la cementación y otro 60% de los COV's remanentes durante la estabilización. (Ortiz, 2004).

En la industria petrolera generalmente se utiliza la cal viva para realizar el proceso de solidificación / estabilización de los residuos peligrosos, pero existen otras sustancias que también pueden ser utilizadas para este propósito.

5.4.1.1. Mezclado de los cortes con cal viva. En el proceso de estabilización con cal viva los cortes son llevados a superficie inicialmente con ayuda del sistema de lodo el cual realiza la descarga en el equipo de control de sólidos. Una vez los cortes pasan por el sistema de control de sólidos se procede a mezclar los recortes con la cal viva (NTC 4343, 1997).

Existen varios sistemas para mezclar los cortes con la cal viva a continuación explicaremos unos de los más utilizados.

Sistema tanque de doble tornillo sin fin: La mezcla se realiza en un equipo denominado “tanque doble tornillo sin fin”, el cual es un dispositivo con dos tornillos helicoidales que giran en direcciones opuestas sobre los cuales se descargan los sólidos y la cal para mezclarse en la proporción requerida (NTC 4343, 1997).

Ventajas

- La mezcla resultante es una homogénea.
- Pueden servir como almacenamiento de contingencia.
- Es un sistema de mezclado continuo.
- El equipo permite el bajo contacto de los operadores con la cal viva.
- El equipo es de fácil manejo y reparación.
- No se requiere la ejecución de obras civiles para instalar el equipo (NTC4343, 1997).

Desventajas

- Se tienen altos riesgos de accidentalidad
- Los problemas en los tornillos mecánicos pueden causar derrames en el área.
- Cuando la zona de disposición de los recortes está lejos de la zona donde se realiza el mezclado se requieren de dos o más volquetas para el transporte de los cortes estabilizados (NTC4343, 1997).

Sistema carro mezclador: Este tipo de sistemas se utiliza cuando se requiere mezclar grandes volúmenes de cortes con cal viva. El equipo consta de un tambor mezclador que va rotando con aspas en su interior el cual recibe la descarga de cortes junto con la cal para garantizar la calidad del mezclado en la concentración apropiada (NTC4343, 1997).

Ventajas

- La mezcla resultante es muy homogénea.
- Maneja grandes volúmenes.
- Es fácil de trasladar, lo cual permite hacer la mezcla en la descarga del equipo de control de sólidos o en el lugar de la disposición de los cortes.
- Se tiene un mayor control de dosificación de la cal viva (NTC4343, 1997).

Desventajas

- Existe un contacto directo de los operadores con la cal.
- Requiere un sistema de almacenamiento adicional.
- Se produce la emanación de vapores tóxicos.
- No es un sistema continuo (NTC4343, 1997).

5.4.1.2. Calidad de la cal viva. La cal viva usada para la fijación de cortes debe estar deshidratada y tener un contenido de cal activo por lo menos del 80% el cual se verifica mediante la prueba de óxido de cal activo. La cal no debe contener metales pesados mayores a los estipulado en la norma NTC 4343.

En la tabla 4 se muestran los valores máximos de metales pesados en la cal viva.

Tabla 4.

Concentración máxima de metales pesados en la cal viva.

Contaminante	Concentración (mg/l)
Arsénico	5
Bario	100
Cromo	5
Mercurio	0.1
Plata	5
Plomo	5
Selenio	1

Nota: En la tabla 4 se especifican los requerimientos de metales pesados en la cal viva para realizar el proceso de solidificación/estabilización de los cortes de perforación. Tomado de (NTC4343, 1997)

Las concentraciones estipuladas en esta tabla deben cumplirse y su verificación se hace a través de la prueba de caracterización de la toxicidad de los lixiviados, para metales pesados.

5.4.1.3. Proporciones de la mezcla. Según la norma NTC 4343 las proporciones en las que se deben mezclar la cal con los cortes dependen del contenido de aceite del corte (NTC 4343, 1997). La tabla 5 establece las proporciones de los cortes con la cal viva dependiendo del contenido de aceite.

Tabla 5.

Proporciones de la mezcla.

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

Nota: En la tabla 5 se muestran las proporciones de mezcla en porcentaje en peso de los cortes de perforación con la cal viva al 80% y los requerimientos de agua para el proceso de mezclado, estos datos deben ser reajustados según la norma cuando la cal empleada no es del 80% de pureza. Tomado de (NTC4343, 1997)

5.4.1.4. Resultados del proceso de estabilización con cal viva. Finalmente, para determinar si la fijación de los cortes con cal se ha realizado correctamente se debe realizar la prueba de la botella a una muestra de cortes tratados con cal. Si el resultado de esta prueba arroja una película de aceite, quiere decir que la cantidad de cal utilizada no fue suficiente y se deben tratar los cortes nuevamente (NTC4343, 1997).

5.4.2. Lavado y extracción con solventes. Al igual que el proceso de solidificación / estabilización, comúnmente se utilizan las técnicas de lavado del suelo y la extracción de contaminantes con solventes, en conjunto.

El lavado de suelo consiste en la implementación de líquidos para depurar los componentes contaminantes del suelo concentrándolos en la fase líquida, generalmente en este proceso se utiliza una solución acuosa mezclada con algunos aditivos químicos que arrastran los contaminantes hacia el sistema de recolección de lixiviado en el caso de que se realice ex situ o hacia pozos de extracción en el caso de que la técnica se desarrolle in situ.

Por otra parte, la técnica extracción con solvente garantiza la extracción de los contaminantes orgánicos peligrosos de los cortes de perforación implementando un solvente que se encarga de retirar dichos contaminantes. Esta técnica no asegura la destrucción de los contaminantes, pero los concentra para que sea más fácil reciclarlos o destruirlos usando otras técnicas (Argote & Martínez, 2011, p55-56).

El proceso de extracción con solvente consiste en poner en contacto el suelo contaminado con el solvente, la mezcla resultante se dividirá en 3 fases distintas en las cuales se concentran los contaminantes: solvente con contaminantes disueltos, material sólido y agua. Las fases separadas pueden ser tratadas individualmente.

En el proceso de lavado se pueden utilizar las siguientes mezclas para la extracción de los contaminantes:

- Agua, cuando se requieren extraer componentes fácilmente solubles en agua.
- Agua o ácidos, cuando se requieren extraer metales y contaminantes orgánicos.
- Agua con bases, para extraer fenoles y algunos metales
- Agua con agentes tensoactivos, cuando se necesitan retirar contaminantes oleosos.

En el proceso de extracción con solventes estos se pueden utilizar las siguientes sustancias:

- Dióxido de carbono líquido
- Propano
- Metanol
- Acetona
- Otros

En la figura 8 se muestra el proceso de lavado y extracción con solventes.

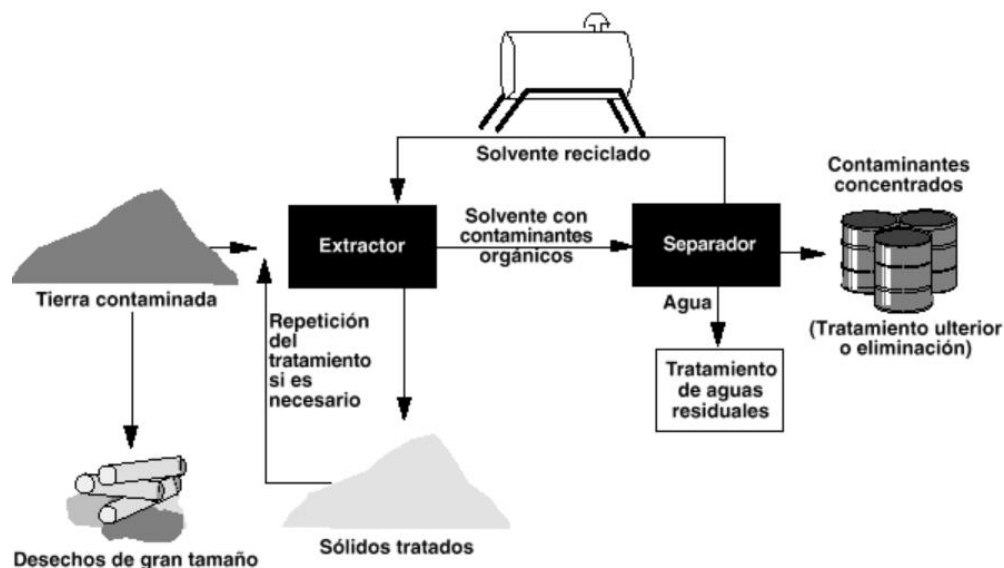


Figura 8. Lavado y extracción con solventes. La figura muestra el proceso tanto ex situ como in situ del lavado y extracción con solventes. Inicialmente el suelo contaminado es tamizado para separar los sólidos de grano grueso con poca capacidad absorbente que luego son desechados, los sólidos que atraviesan el tamiz pasan a un extractor el cual cuenta con un sistema de agitación para favorecer la absorción de los contaminantes en el líquido, los sólidos tratados después de salir del extractor pueden estar listos para disponerlos o si no cumplen con los parámetros para disposición pueden ser recirculados en el sistema de tratamiento. La parte líquida que sale del extractor que lleva los contaminantes disueltos pasa a un separador en el cual se separan los contaminantes y el solvente es recirculado en el sistema. Los contaminantes concentrados pasan a un sistema de tratamiento de aguas residuales. (EPA, 1996).

En este proceso se elimina el riesgo de contaminación por lixiviación de los sólidos tratados pues el contaminante pasa de la fase sólida a la fase líquida, pero no se elimina el contaminante, el contaminante reconcentrado líquido por último debe pasar a un sistema de tratamiento de aguas residuales.

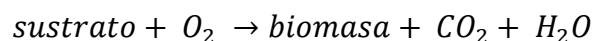
5.5. Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos pueden llevarse a cabo in situ o ex situ, su finalidad es descomponer los contaminantes orgánicos que se encuentran en los suelos o cortes contaminados.

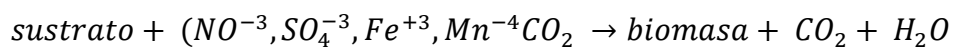
5.5.1. Biorremediación. Consiste en la utilización de microorganismos capaces de convertir los hidrocarburos en fuente nutricional de energía como los hongos y las bacterias para convertir moléculas de hidrocarburo complejas y de otros compuestos, en moléculas más simples resultando un compuesto que se convierte en agua y dióxido de carbono. La biorremediación puede ocurrir en condiciones aeróbicas o anaeróbicas (Maroto y Rogel, sf).

El proceso bioquímico de la biorremediación consiste en la producción de reacciones oxidoreducción cuyo fin es la obtención de energía. Estas reacciones se producen en la cadena respiratoria o transportadora de las células. Todo comienza con un sustrato orgánico (compuestos hidrocarburos), este sustrato es externo a la célula y actúa como dador de electrones, de tal forma que la actividad metabólica de la célula termina degradando y acabando con dicha sustancia. Por otra parte, están los aceptores como el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono (Maroto y Rogel, sf). Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:

Degradación aeróbica



Degradación anaeróbica



Si el oxígeno actúa como aceptor de electrones, la respiración microbiana es aeróbica y por tanto la degradación de los contaminantes será de tipo aeróbica. Sin embargo, si se utilizan los sulfatos o el dióxido de carbono, la reacción se produce en condiciones anaeróbicas o reductoras y por tanto la degradación será de tipo anaeróbica (Maroto y Rogel, sf).

Los factores que afectan el proceso transformación de los contaminantes son:

- Necesidad de nutrientes
- pH del suelo
- Temperatura.
- Humedad
- Estructura química del hidrocarburo (Maroto y Rogel, sf).

La biorremediación es una de las mejores técnicas para la descomposición de hidrocarburos que han contaminado el suelo (Thompson et al. 2008). Las técnicas de biorremediación son:

5.5.1.1. Bioventing. Es la inyección a presión de oxígeno al suelo a través de pozos de inyección y también de nutrientes con el fin de favorecer la biodegradación de los hidrocarburos presentes en el suelo debido a que el oxígeno estimula la actividad bacteriana y facilita la volatilización de los contaminantes. Esta técnica es recomendada para hidrocarburos de peso mediano debido que los de peso ligero tienden a volatilizarse más rápido (Maroto y Rogel, sf).

En esta técnica se requiere tener un control de las emisiones para evitar la contaminación atmosférica debido a la volatilización de hidrocarburos, es eficiente para la eliminación de contaminantes orgánicos. El riesgo de lixiviación en este tipo de técnica es alto pues si el material contaminado no es tratado antes de que se presenten lluvias en la zona, se puede dar movilización de estos contaminantes en el Suelo afectando otras zonas.

5.5.1.2. Biopilas. Es una técnica ex situ que consiste en la formación de pilas de material biodegradable formados por suelo contaminado y materia orgánica en piscinas previamente excavadas en condiciones favorables para que se dé el proceso de biodegradación, cuentan con sistemas de recolección de lixiviados y sistemas de aireación. Estas pilas pueden ser aireadas volteando la pila o mediante tubos perforados de aireación. Estas pilas se suelen cubrir para evitar la evaporación y es por esto que se usa esta técnica cuando los contaminantes son muy volátiles ya que las emisiones de gases a la atmosfera pueden ser demasiado altas o cuando se requiere acelerar el proceso de biorremediación (Maroto y Rogel, sf).

En el fondo de la piscina de tratamiento se cuenta con una membrana impermeable para evitar la lixiviación de los contaminantes hacia el suelo durante el tratamiento y con un techo para impedir la evaporación de componentes volátiles, los lixiviados recolectados son tratados en un sistema de tratamiento de aguas residuales y los residuos sólidos pasan a ser depositados bien sea en vertederos o esparcidos sobre terrenos en campo , el riego de lixiviación de componentes orgánicos se elimina y los contaminantes inorgánicos siguen siendo un riesgo latente de contaminación debido a que no son eliminados en este proceso.

5.5.1.3. Land farming. Es una técnica ex situ en la cual se escaba el suelo contaminado y se dispone sobre una superficie impermeable que pueden ser una geomembrana ubicada en la zona adyacente a la zona contaminada o en una piscina excavada cerca a esta zona. Al igual que el sistema de Biopilas, la técnica Land farming también tiene un sistema de recolección de lixiviados, los lixiviados retirados del sistema de recolección son tratados por aparte. El proceso consiste en la estimulación microbiana de los microorganismos presentes en el suelo a través de la aireación y la adición de nutrientes minerales y agua, la aireación se consigue a través de la labranza o arado del terreno. En este proceso se requiere que el suelo este bien mezclado para que haya mayor área

de contacto entre los compuestos orgánicos y los microorganismos, y también que haya una buena oxigenación del suelo para que se produzca la degradación aeróbica (Bolaños, 2014, p42).

Esta técnica es efectiva para la eliminación de contaminantes orgánicos, el riesgo de lixiviación se materializa cuando se cumple el tiempo de vida útil de la membrana sobre la cual se disponen los residuos.

5.5.1.4. Bioestimulación. Es una técnica tanto in situ en la que los suelos contaminados son tratados con una solución o suspensión acuosa la cual provee los nutrientes necesarios como el nitrógeno y el fósforo para propiciar la biodegradación de contaminantes orgánicos o para producir la inmovilización de inorgánicos. (Ponce, D., 2014).

El riesgo de lixiviación puede materializarse si se excede la capacidad absorbente del medio en el que se realiza el tratamiento debido a la inundación del terreno.

5.5.1.5. Fitorremediación. La fitorremediación es un proceso in situ que utiliza las plantas para retirar, transferir, concentrar y eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Puede ser aplicado tanto in situ como ex situ. El proceso de fitorremediación se da a través de los mecanismos de rizodegradación (las raíces presentes en el suelo expulsan nutrientes que favorecen la actividad biológica), la fitoextracción (los contaminantes son captados por las raíces y acumulados en los tallos y las hojas), la fitoestabilización (las raíces de las plantas producen unos compuestos químicos que inmovilizan los contaminante, manteniéndolos en la interfase suelo-raíz) y la fitodegradación (los contaminantes son metabolizados al interior de los tejidos de las plantas a través de enzimas) (INECC, 2007).

Cada tipo de planta utilizada en los procesos de fitorremediación puede emplear uno o varios de los mecanismos mencionados anteriormente, el riesgo de lixiviación existe cuando se realiza la

fitorremediación a través del mecanismo de fitoestabilización debido a que los contaminantes no se extraen ni se degradan, sino que se inmovilizan quedando en la interfase raíz-suelo.

5.5.1.6. Composteo. La técnica del compostaje consiste en el mezclado de los recortes de perforación con agentes voluminosos tales como aserrín, cascara de arroz, paja, trocillos de madera secos para de esta manera aumentar la porosidad y facilitar la aireación para la degradación biológica, sin importar el porcentaje de humedad. Además, se puede adicionar estiércol o residuos agrícolas con el fin de incrementar la capacidad de retención de agua de la mezcla y de esta manera incrementar la traza de nutrientes, en cuanto a el mejoramiento de la actividad microbiana y la reducción del tiempo de biodegradación se puede adicionar nitrógeno, fertilizantes a base de fosforo y oligoelementos minerales.

En esta técnica la mezcla de residuos, suelo (para proporcionar bacterias autóctonas) y otros aditivos son colocados en filas para labrarlos con aireación o son colocados en contenedores o plataformas para permitir que el aire sea forzado a través de la mezcla, lo que ayuda a controlar la temperatura y los niveles de oxígeno.

Para optimizar las condiciones de humedad para la biodegradación la mezcla se mantiene de 40 a 60 % de agua en peso.

Las altas temperaturas del compost (30 a 70 °C) aumentan el metabolismo microbiano, pero temperaturas por encima de 70°C inducen a la muerte celular.

El compostaje en contenedores cerrados puede controlar la emisión de los volátiles a la atmosfera.

Los residuos compostados que cumplen con los criterios establecidos pueden ser utilizados para acondicionamiento de suelos, cubrir los sitios de vertimiento o realizar un relleno limpio.

A pesar de que las técnicas de compostaje y land farming son similares, el compostaje suele ser más eficiente debido a que en estos sistemas se pueden controlar y monitorear las propiedades de los residuos porque se encuentran dentro de las instalaciones de compostaje.

La técnica de compostaje debe contar con un sistema de recolección de lixiviados los cuales son tratados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Esta técnica elimina únicamente contaminantes orgánicos por lo tanto cuando los residuos son depositados se debe hacer monitoreo de los contaminantes inorgánicos para evitar la lixiviación de estos.

5.6. Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos utilizan las altas T para recuperar o destruir el material contaminado de hidrocarburos. Estos tratamientos son muy eficaces para la destrucción de compuestos orgánicos y también reducen el volumen y la movilidad de sustancias inorgánicas tales como metales y sales, aunque para la eliminación de estos se necesite realizar tratamientos adicionales dependiendo del destino final de los residuos.

5.6.1. Desorción térmica. Este método se utiliza un proceso no oxidante para vaporizar sustancias volátiles y semi-volátiles a través de la aplicación de calor (temperaturas por encima del punto de ebullición del contaminante) a los cortes produciendo la evaporación de compuestos orgánicos volátiles presentes en ellos. Los vapores producidos no condensables durante el proceso son liberados a la atmósfera a través de un filtro de carbón activado que finaliza la limpieza, los vapores condensables son recondensados y almacenados o también pueden ser utilizados como combustible para generar el calor en el proceso, el material quemado se deposita en botaderos.

Debido a que la desorción térmica es directamente proporcional a la volatilización, la eficiencia del tratamiento depende de que tan volátil sea el contaminante por lo tanto elimina con más facilidad hidrocarburos ligeros aromáticos pero los compuestos más pesados tales como hidrocarburos aromáticos policíclicos serán más difíciles de eliminar. Es recomendada emplearla para cortes de perforación base aceite y para restos solidos impregnados con hidrocarburo que provienen de las instalaciones de tratamiento del crudo como (tanques, separadores, filtros etc.), para cortes base agua cuando el nivel de impregnación del corte con hidrocarburo es mayor al 5% también es recomendable utilizar esta tecnología.

Las unidades de desorción térmicas son equipos muy eficientes capaces de reducir casi que por completo el contaminante del suelo obteniéndose materiales 99.99% libres de hidrocarburos.

Esta técnica se puede emplear de dos formas. A bajas temperaturas se utiliza para recuperar el hidrocarburo y a altas temperaturas se emplea para destruir todos los compuestos orgánicos presentes (Fernández, 2016, p.24-25).

Se disminuye el riesgo de lixiviación si el material residual es quemado y reutilizado para generar calor en el proceso, la gran desventaja de esta tecnología es que se generan grandes cantidades de emisiones de gases por lo que usarla manera masiva generaría un gran impacto a la atmosfera.

5.6.2. Incineración. En este método se realiza la combustión de los residuos a altas temperaturas por lo general 1200 a 1500 °C para destruir los residuos orgánicos que son altamente tóxicos, inflamables, resistentes a la descomposición biológica o suponen altos niveles de riesgo para la salud humana y el medio ambiente además de convertir los materiales en menos voluminosos y que no son peligrosos o menos peligrosos de lo que eran antes de la incineración.

Entre más alta la temperatura mayor la eficiencia del tratamiento. Los metales presentes en el corte no son destruidos, generalmente se convierten en óxidos menos tóxicos, por otro lado, los compuestos orgánicos son destruidos eficientemente.

Los gases producidos en el incinerador pasan a una unidad de control de contaminación al aire para eliminar cualquier metal, ácido o partícula de ceniza remanente.

Las cenizas son almacenadas y analizadas para determinar que cumplen con los parámetros estipulados en la normatividad, luego, si este análisis resulta dentro de los parámetros legales, las cenizas son sepultadas en sitios estipulados para el confinamiento, si no, deben ser reincineradas o tratadas por otros métodos.

Las ventajas de la incineración es que reduce la cantidad de residuos y destruye casi que completamente los componentes contaminantes presentes en los cortes. Una de las grandes desventajas de este tipo de técnica es que emite muchos gases de efecto invernadero.

La incineración es utilizada para residuos con componentes muy pesados que no pueden ser tratados por desorción térmica (Fernández, 2016, p.24).

De igual manera que en la desorción térmica el material quemado queda con características parecidas al carbón y puede ser reutilizado para generar calor. El riesgo de lixiviación de esta tecnología se disminuye siempre y cuando los desechos sean reutilizados con ese fin, de lo contrario si lo que se hace es una disposición en terreno o entierro de los residuos, el material aun contiene esos metales pesados que se transformaron en óxidos menos tóxicos pero que también generan un impacto en el medio en el que se dispongan.

6. Disposición final de los recortes de perforación

Etapas de la gestión operativa de los residuos que consiste en depositar de forma permanente los residuos en un espacio físico. (Ley de Gestión Integral de Residuos N.º 755, 2015)

6.1. Entierro

El entierro es la colocación de los residuos en fosas o vertederos. Enterrar los recortes es una de las técnicas más comunes de disposición de los recortes de perforación y lodos. Generalmente, los recortes son enterrados en la misma fosa de reserva usada para la recolección y almacenaje temporal de los recortes y lodos de perforación, una vez estos hubieran sido tratados previamente. La fosa de entierro es un método barato y no requiere de equipos sofisticados, ni tampoco necesita que los recortes sean transportados desde la locación del pozo, por lo que muchos operadores optan por esta práctica (Fernández, 2016, p.26).

6.2. Fosa de recortes

El uso de fosas recubiertas es de gran uso para el manejo de residuos de perforación. Durante las operaciones de perforación, los recortes separados de las zarandas son enviados a una fosa llamada

fosa de reserva situada en las proximidades de la torre de perforación. Generalmente la fosa se encuentra abierta a la atmosfera, por lo que también acumula agua de lluvia y agua utilizada para lavar el equipo de perforación. La ubicación estratégica de las fosas ayuda a minimizar derrames de materiales de desecho. Las fosas deben ser recubiertas para evitar la contaminación del suelo. Al final de la perforación del pozo, cualquier producto de hidrocarburo que se encuentre flotando en la fosa es recuperado, así como también el agua que se encuentra acumulada para su tratamiento si es necesario o su inyección. Los recortes remanentes son cubiertos en la misma fosa usando tierra virgen, la superficie es clasificada para prevenir la acumulación de agua, y el área es reforestada con especies nativas para reducir la erosión potencial y promover la completa recuperación del área del ecosistema. La fosa de reserva deberá ser cerrada tan pronto sea posible siguiendo los procedimientos de cierre en cada región. Para los residuos con componentes de concentraciones ligeramente mayor que los límites permisibles para el entierro tradicional en fosa, los recortes son mezclados con suelo limpio del lugar, para diluir y reducir las concentraciones a niveles aceptables y luego son enterrados. Los costos para el entierro de los recortes en la fosa dependen del volumen de suelo requerido para ser mezclado y disminuir las concentraciones de aceite y grasa dentro de los límites (ejemplo $< 3.0\%$ en peso), costos de excavación de la fosa, y costos de carga y traslado de los recortes (Fernández, 2016, p.26-27).

6.3. Vertederos

Pueden ser utilizados para la disposición de los recortes de perforación y otros residuos de los campos petroleros. En algunas circunstancias, estos vertederos no se encuentran cerca a la

ubicación del campo y pueden recibir los residuos de otros campos. Por otro lado, las compañías petroleras que generan grandes cantidades de residuos construyen sus propios vertederos. Por ejemplo, totalfinael diseñó y construyó un vertedero controlado para disponer de los residuos inertes en un área remota en Libia, donde otras alternativas de manejo no estaban fácilmente disponibles. En este vertedero, un recubrimiento se colocó en el fondo para prevenir la contaminación del suelo, así también se colocó permanentemente un recubrimiento en la superficie que recubría los residuos en periodos en que no se perforaban los pozos; este recubrimiento permanecería después de que el vertedero sea cerrado (Fernández, 2016, p.27).

7. Comparación técnico-económica de las metodologías para la eliminación y el control de lixiviados de los cortes de perforación.

Al momento de seleccionar una tecnología de tratamiento para cortes de perforación se deben tener en cuenta todos los aspectos que se describirán en este capítulo, entre ellos, unos de los más importantes son la incidencia ambiental y el costo de tratamiento. de En la tabla 6 se hace la comparación técnica de las metodologías para el tratamiento de cortes.

Tabla 6.

Comparación técnica.

Tratamientos		Lugar de tratamiento		Contaminante		Naturaleza del lodo		Tiempo de tratamiento
		In situ	Ex situ	Inorgánicos	Orgánicos	Base agua	Base aceite	R-M-L
Químicos	Solidificación-Estabilización	✓	✓	✓	✓	✓	✓	R-M
	Lavado y extracción con solventes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	R
Biorremediación	Bioventing	✓			✓	✓	✓	M-L
	Biopilas		✓		✓	✓	✓	R-M
	Land farming		✓		✓	✓	✓	M-L
	Bioestimulación	✓		✓	✓	✓	✓	L
	Fitorremediación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	L
	Composteo		✓		✓	✓	✓	R-M
Térmicos	Desorción térmica		✓		✓	✓	✓	R
	Incineración		✓		✓	✓	✓	R

Nota: En la tabla 6 se muestra la comparación técnica de los tratamientos más utilizados en la industria para la eliminación de componentes contaminantes en los cortes de perforación y evitar la lixiviación de estos hacia el subsuelo, en la tabla las siglas R, M y L significan rápido (semanas), moderado (meses) y lento (años). Los tiempos varían dependiendo de la cantidad de cortes tratados y del grado de contaminación de los recortes. Adaptado de: (INECC,2007).

En las figuras 9, 10, 11 y 12 se realiza la clasificación de las tecnologías de acuerdo a los parámetros técnicos enunciados en la tabla 6.

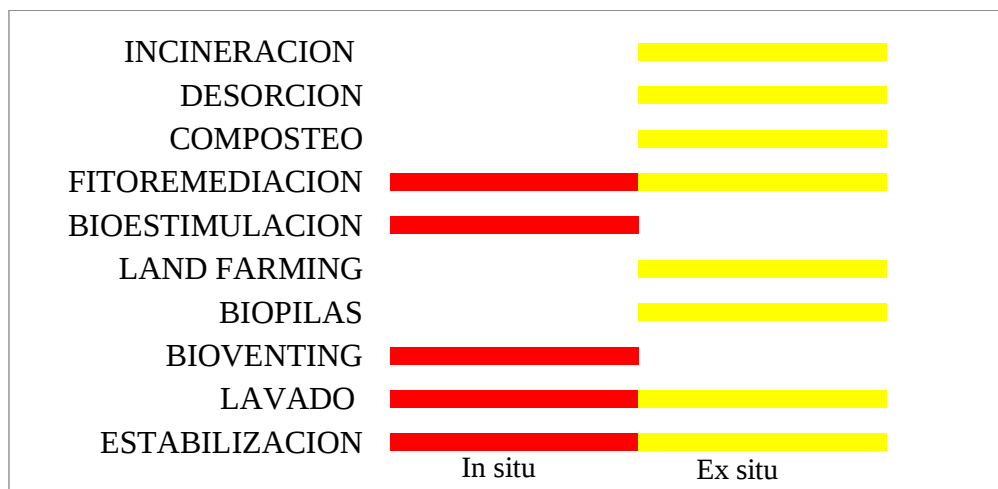


Figura 9. Caracterización de las tecnologías según su lugar de tratamiento.

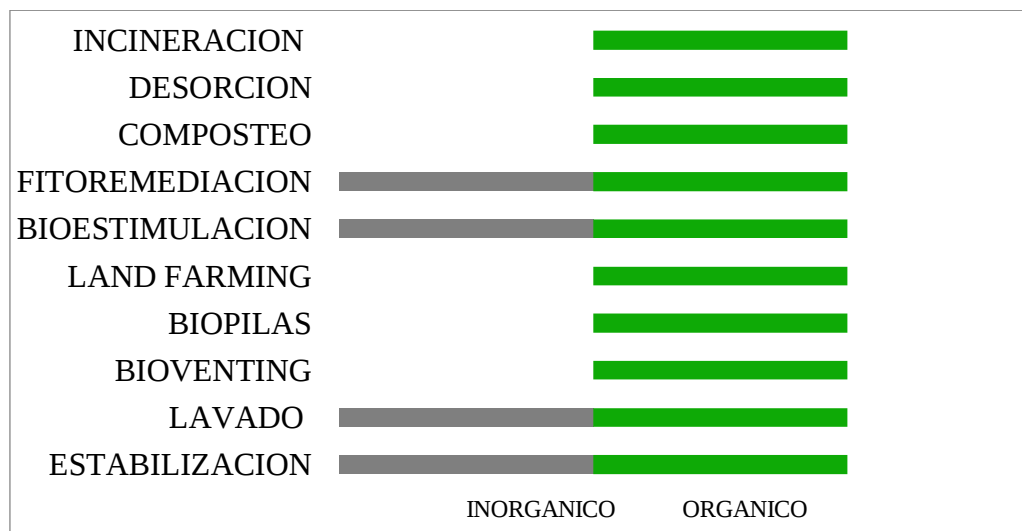


Figura 10. Clasificación de las tecnologías según el tipo de contaminante que eliminan o inmovilizan.

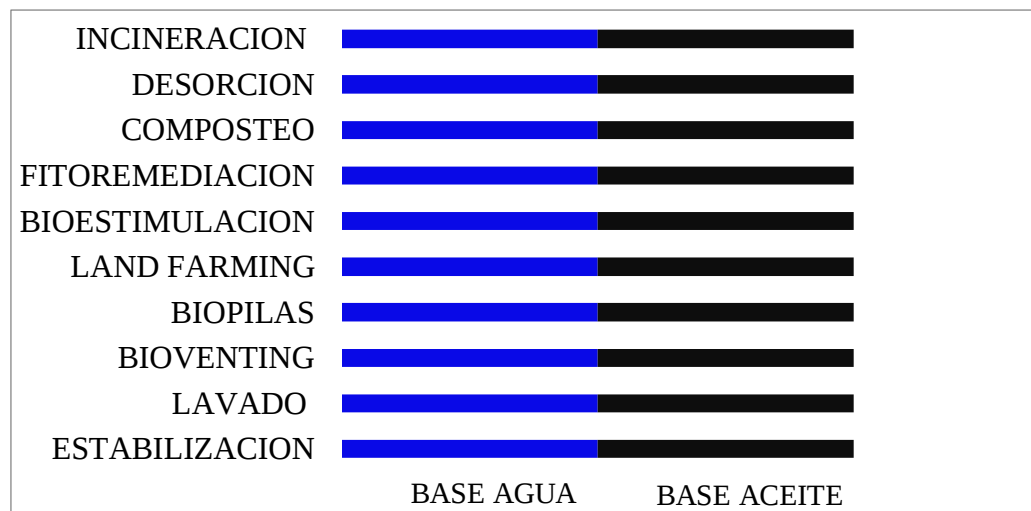


Figura 11. Clasificación de las tecnologías según la base del fluido de perforación utilizado.

Los tratamientos para cortes de perforación plasmados en este proyecto se pueden utilizar tanto para cortes impregnados con lodo base aceite como para cortes impregnados con lodo base agua, pero al momento de escoger el tipo de tratamiento a aplicar se deben tener en cuenta las ventajas y limitaciones de estos tratamientos mencionadas en este proyecto con el fin de lograr el manejo adecuado de los cortes de perforación sin generar grandes afectaciones al medio ambiente.

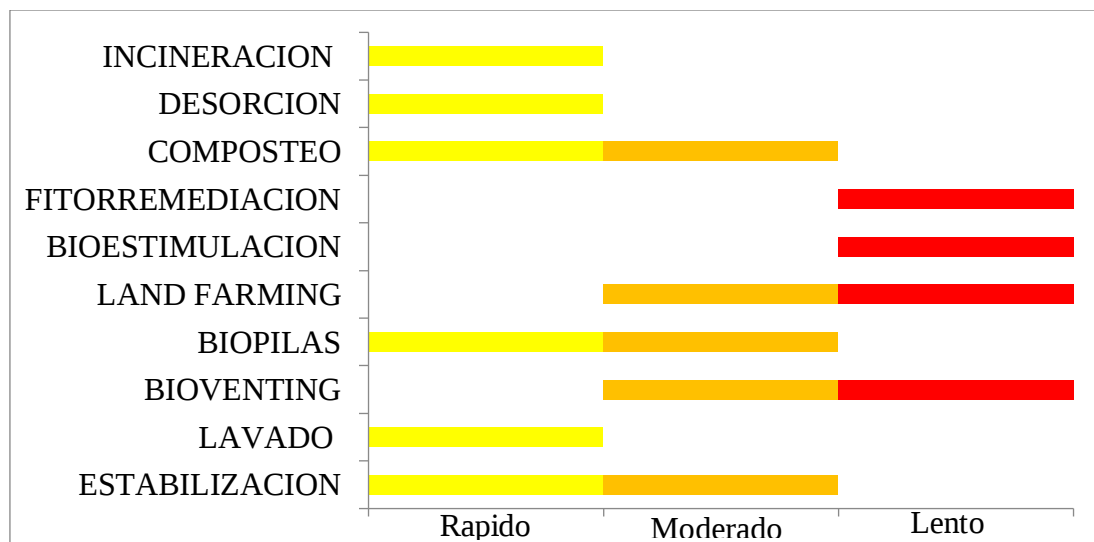


Figura 12. Tiempos de tratamiento.

Tabla 7.

Comparación económica.

	Tratamiento	Costo
Químicos	Solidificación-Estabilización	130-325 usd/m ³
	Lavado y extracción con solventes	120-300 usd/m ³
Biorremediación	Bioventing	10-70 usd/m ³
	Biopilas	78-260 usd/m ³
	Land farming	30-70 usd/m ³
	Bioestimulación	30-100 usd/m ³
	Fitorremediación	15-48 usd/ m ³
	Composteo	130-260 usd/m ³
Térmicos	Desorción térmica	50-350 usd/m ³
	Incineración	325-650 usd/m ³

Nota: En la tabla 7 se muestra la comparación económica de los tratamientos más utilizados en la industria para la eliminación de componentes contaminantes en los cortes de perforación y evitar la lixiviación de estos hacia el subsuelo. Adaptado de: (INECC,2007).

En la figura 13 se grafican los rangos de costos para cada tratamiento. El costo de tratamiento puede variar dependiendo el volumen de residuos tratados.

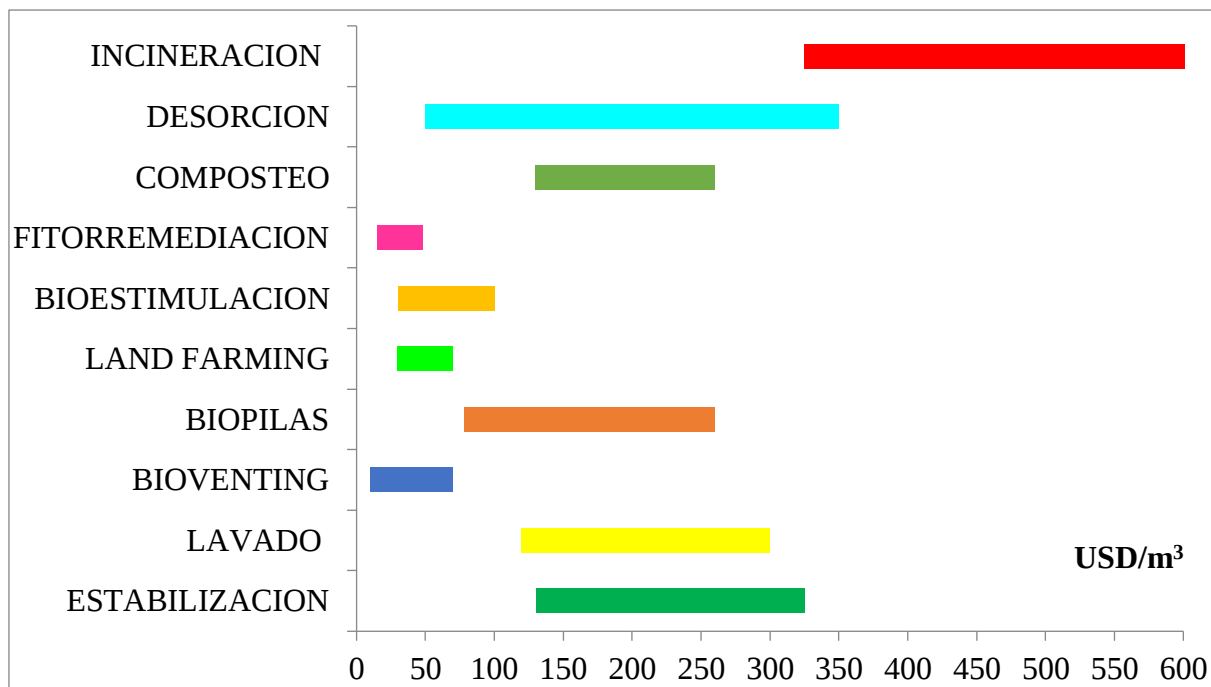


Figura 13. Grafica de costos. La grafica muestra el rango de precios para cada tipo de tratamiento en dólares por metro cubico.

En la figura 13 se pueden observar los rangos de los precios para cada tratamiento, de aquí se deduce que las tecnologías más económicas son: fitorremediación, Bioventing, land farming y bioestimulación.

A continuación, en la tabla 8 se dictan algunas observaciones que se deben tener en cuenta para cada tratamiento y se explica la impacto o incidencia ambiental que se puede causar con cada tratamiento.

Tabla 8.

Observaciones de los tratamientos.

		Tratamiento	Observaciones e incidencia ambiental
Químicos		Solidificación-Estabilización	No es recomendable usar este tratamiento en cortes base aceite porque con el tiempo el proceso se vuelve inestable y se puede producir lixiviación. Es efectivo en cortes base agua con poca cantidad de aceite libre. Se generan emisiones al aire puesto que durante el proceso se puede perder un 90% de los compuestos orgánicos volátiles debido a las reacciones exotérmicas presentes en el proceso de cementación. Se produce un aumento en el volumen del residuo por la adición de la agente ligante, por lo cual se requiere mayor espacio para la disposición de los cortes. Es difícil predecir el comportamiento a largo plazo de los residuos estabilizados por lo cual requiere de un continuo monitoreo para evitar el riesgo de lixiviación.
		Lavado y extracción con solventes	Se eliminan los contaminantes del suelo por lo tanto no hay riesgo de lixiviación en la disposición de los residuos, el proceso debe contar con un sistema de recolección de lixiviados para recolectar el solvente contaminado. Esta tecnología no es aplicable para suelos con baja permeabilidad. Cuando se realiza in situ, si el disolvente no es efectivo, puede provocar la migración de contaminantes a otras zonas de suelo limpias. El líquido extraído del proceso no puede ser reutilizado y debe pasar por un sistema de depuración de contaminantes después que se haya terminado el proceso por lo cual genera un aumento en los costos de tratamiento. En la implementación de este tratamiento pueden quedar remanentes de la solución de lavado o del disolvente en el suelo generando la contaminación de este. La presencia de soluciones básicas en el suelo disminuye el pH y produce la acidificación del terreno, lo cual puede causar biodisponibilidad de elementos tóxicos para las plantas. No se ha encontrado una solución que se pueda utilizar para retirar tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos al mismo tiempo, por lo tanto, en el caso de mezclas de estos contaminantes presentes en los cortes

Biorremediación		primero se debe utilizar un disolvente para extraer orgánicos y otro para extraer inorgánicos lo cual se puede traducir en altos costos.
	Bioventing	Recomendable para cortes impregnados con hidrocarburos de mediano peso molecular. Recomendable para suelos con bajo contenido de arcilla y homogéneos. Los equipos son económicos pero los costos pueden variar dependiendo de las características del suelo, espacio, numero de pozos de venteo y velocidad de aireación. Se produce perdida de nutrientes en el subsuelo. Los contaminantes se biodegradan, pero gran parte de ellos son volatilizados por lo que se producen emisiones a la atmosfera.
	Biopilas	A pesar de que las técnicas de biorremediación no están diseñadas para eliminar componentes metálicos y algunos orgánicos clorados, por medio de las Biopilas se pueden eliminar algunos de estos residuos peligrosos que se resisten a diferentes formas de tratamiento. El proceso debe tener sistemas de recolección de lixiviados. Se generan gases y vapores que deben ser tratados para luego ser emitidos a la atmosfera. Durante la socavación del terreno se puede producir la emisión de contaminantes volátiles a la atmosfera.
	Land farming	Tecnología recomendada para productos semi-volátiles a pesados y en suelos arcillosos, en caso de no existir suelos arcillosos para esparcir los residuos, se debe utilizar una membrana impermeable para evitar la percolación de lixiviados. Se debe tener especial cuidado debido a que las fracciones volátiles tienden a evaporarse directamente en el aire en lugar de ser biodegradadas.
	Bioestimulación	No es recomendable en suelos arcillosos porque pueden ocasionar limitaciones en la transferencia de O ₂ .
	Fitorremediación	Los contaminantes orgánicos se degradan en productos inofensivos y se metabolizan en los tejidos vegetales convirtiéndose en CO ₂ y H ₂ O, puede ser eficiente para contaminantes inorgánicos, se caracteriza por ser un proceso muy lento. En el caso de la fitoextracción los contaminantes acumulados en las hojas de las plantas pueden ser liberados nuevamente al ambiente y los contaminantes acumulados en madera pueden liberarse por procesos de combustión.

Términos	Composteo	Reduce las concentraciones de hidrocarburos efectivamente, no se utiliza para metales por lo tanto puede haber lixiviación de los mismos debido a que no suele utilizarse para éste membranas impermeables. El material utilizado puede atraer mosquitos, moscas e insectos que pueden afectar a las comunidades cercanas. Al igual que en las técnicas de biodegradación anteriores también se presenta la emisión de contaminantes volátiles a la atmosfera.
	Desorción térmica	Si se utiliza vapor puede costar más de 400 usd/m3, se utiliza para remover orgánicos y agua de recortes de perforación, no hay eliminación de metales y se requiere un lugar especial para la disposición de los residuos. La incidencia ambiental de este tratamiento se produce por la emisión de vapores y contaminantes gaseosos a la atmosfera.
	Incineración	La incineración es útil para desechos orgánicos, se requiere control atmosférico debido a las emisiones que se presentan al momento de realizar el proceso, los metales pesados se convierten generalmente en óxidos menos tóxicos y las cenizas por lo general son inertes y se puede sepultar en sitios de confinamiento o tratarse por medio de fijación química.

Nota: En la tabla 8 se muestran algunas observaciones de los tratamientos más utilizados en la industria para la eliminación de componentes contaminantes en los cortes de perforación y evitar la lixiviación de estos hacia el subsuelo.

8. Casos de estudio.

Basado en el análisis técnico, económico y ambiental del capítulo anterior, las tecnologías de biorremediación son las que más se ajustan a los requerimientos económicos de las compañías

petroleras y al requerimiento ambiental de las organizaciones protectoras del medio ambiente, por lo tanto, a continuación, se muestran dos ejemplos de tratamientos de biorremediación en los cuales se evidencio el riesgo de lixiviación. Los ejemplos mencionados a continuación son ejemplos extranjeros, ya que debido a la escasa información y las políticas de privacidad de las empresas en cuanto a este tema en el país no nos fue posible plasmar casos de estudios colombianos.

8.1 Bioestimulación de cortes de perforación en Tamaulipas, México.

Según el informe “Bioestimulación y biorremediación de cortes de perforación contaminados con hidrocarburos”, se realizó un estudio a 3 suelos del estado de Tamaulipas, México, mezclados con cortes contaminados con hidrocarburos con el fin de saber si los suelos de la zona eran capaces de inducir la descomposición de los hidrocarburos de los suelos contaminados mediante la técnica de bioestimulación llevando la concentración de estas sustancias contaminantes hasta un nivel tolerable para el cultivo de maíz y aceptable para la norma oficial mexicana (NOM)(SERMANAT 2012). (Rivera P, Rivera J, Andrade, Heyer, De la garza, Castro, 2017).

La zona de estudio pertenece a la cuenca Burgos, la cual es altamente productora de gas natural. Con el desarrollo de la industria en esta zona, se han producido cantidades considerables de desechos sólidos provenientes de las operaciones de perforación, dichos desechos, anteriormente eran tratados con tratamientos térmicos ex situ pero a pesar de esto, estos desechos después de ser tratados aun conservaban cierta cantidad de hidrocarburos por lo cual el riesgo de lixiviación hacia el suelo y fuentes de agua cercanas aún era latente, además, con el uso de estas técnicas térmicas se generan grandes impactos al aire por las altas cantidades de emisiones que producen y altos

costos de tratamiento por el consumo de grandes cantidades de combustibles para producir calor. La alternativa planteada para este caso de estudio fue la utilización microorganismos autóctonos del suelo para inducir la degradación de los hidrocarburos (biorremediación). (Rivera P, Rivera J, Andrade, Heyer, De la garza, Castro, 2017).

Para objeto de este proyecto se tomó únicamente el ensayo I del caso de estudio. El proceso consistió en mezclar el suelo de la zona con los cortes de perforación contaminados y proporcionar las condiciones necesarias aireación, humedad y nutrientes (urea (N) y fosfato diamónico (P)) para la vida microbiana a lo cual denominamos “Bioestimulación”. Las mezclas fueron colocadas en celdas de biorremediación instaladas en el terreno bajo condiciones controladas de aireación, humedad y disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y fosforo y se sembraron plantas de maíz sobre las mezclas para determinar cuál era la respuesta del cultivo a la biorremediación de los cortes contaminados. (Rivera P, Rivera J, Andrade, Heyer, De la garza, Castro, 2017).

En este informe se realizaron varios ensayos con diferentes configuraciones en las celdas. En el ensayo I las configuraciones incluían la mezcla de suelo con cortes de perforación, otros simplemente se depositaban los recortes de perforación o suelo agrícola en la celda, y otras incluían la mezcla de suelo con cortes de perforación y nutrientes, pero en todas configuraciones se sembraron plantas de maíz para determinar la respuesta del cultivo de maíz al proceso. (Rivera P, Rivera J, Andrade, Heyer, De la garza, Castro, 2017).

La concentración de hidrocarburos en las mezclas de suelos con cortes de perforación impregnados con hidrocarburos era de 25000 mg/kg, mientras que en los cortes de perforación solos eran de 37000 mg/kg. Como resultado de este ensayo se observó una disminución en el contenido de hidrocarburos, aunque en las configuraciones que solo contenían recortes de perforación se observó una disminución del contenido de hidrocarburos menor a la de las configuraciones en las que se mezclaba suelo con cortes de perforación, sin embargo, estas

configuraciones de suelo más cortes no cumplieron con el requerimiento de la NOM-138-SERMANAT/SSA1-2012 que es 3000 mg/kg para suelos agrícolas ya que el contenido de hidrocarburos se redujo solo hasta 10536 mg/kg a pesar de haber sido incubadas durante 12 meses, mientras que en la mezcla con nutrientes adicionales se observó una disminución en el contenido hasta los 3586 mg/kg un valor cercano a los 3000 mg/kg exigidos por la norma en un periodo de 6 meses. (Rivera P, Rivera J, Andrade, Heyer, De la garza, Castro, 2017).

En la figura 14 se muestra el resultado para configuración en las celdas de biorremediación.



Figura 14. Resultados de los experimentos. La figura muestra los resultados del ensayo I del caso de estudio. se observa alta respuesta al crecimiento de las plantas en el caso de la configuración de suelos mezclados con cortes de perforación impregnados con hidrocarburos y con adición de nutrientes N y P.

En el desarrollo de este proyecto, se midió también la conductividad eléctrica y se observó un descenso en este parámetro, el cual fue atribuido a la lixiviación de sales solubles hacia el suelo de

los alrededores debido a que en la segunda semana de haber iniciado el experimento y durante los primeros 3 meses de tratamiento, se presentaron precipitaciones pluviales lo cual produjo la lixiviación de estos compuestos hacia el suelo, de igual manera también se presentó lixiviación de hidrocarburos aunque no haya sido muy significativa. (Rivera P, Rivera J, Andrade, Heyer, De la garza, Castro, 2017).

Lo anterior corrobora, que, durante la aplicación de las tecnologías de tratamiento implementadas para eliminar el contenido de hidrocarburos en suelos contaminados, se puede producir lixiviación de los hidrocarburos y demás contaminantes solubles por las lluvias constantes en la zona de tratamiento.

8.2. Tratamiento de recortes pozo lqc-x1 ubicado en el sub andino norte, departamento de la paz, Bolivia.

Proceso: El tratamiento de los recortes fue realizado por la empresa SESIGA BUHOS S.A. la cual llevó a cabo el siguiente proceso:

Almacenamiento: Se almacenó temporalmente los recortes, suelos y residuos de perforación en contenedores para luego proceder a transportarlos hasta el centro de acopio como se muestra en la figura 15. (Fernandez,2016)



Figura 15. Contenedores con recortes de perforación. Tomado de (Fernández, 2016).

Transporte: Como se muestra en la figura 16, el transporte se realizó en función que los residuos estaban impregnados con lodo base agua y se usaron volquetas las cuales estaban debidamente acondicionadas para prevenir derramen y/o contingencias. El volumen total de recortes transportados fue 4470,12 m³. (Fernandez,2016).



Figura 16. Cargue y transporte de recortes. Tomado de (Fernández, 2016).

Tratamiento: SESIGA BUHOS S.A. usó la siguiente metodología para el tratamiento de los recortes:

1. Caracterización organoléptica, física, química y microbiológica de los lodos base agua, estableciendo la línea base ambiental.
2. Pretratamiento físico: homogeneización y estructuración de los lodos base agua.
3. Tratamiento biológico: biopila mecanizada.

El proceso que se realiza en el tratamiento de estos recortes de perforación consiste en realizar la estructuración y homogenización mediante el mezclado constante con suelo orgánico y conformación de biopilas para promover mayor aeración y su correspondiente vaporización y secado mediante el volteo mecanizado. (Fernandez,2016).

Caracterización de los recortes: En cumplimiento a lo establecido en el art. 34 del Reglamento Ambiental para el Sector de Hidrocarburos (RASH), se realizó la caracterización de los recortes de perforación, con la finalidad de definir la línea base ambiental de los contaminantes y de esta manera monitorearlos constantemente durante el periodo de duración del tratamiento. El objetivo de la caracterización de los recortes al inicio del tratamiento permite establecer el punto de partida del proyecto y de esta manera poder realizar un mejor seguimiento a los contaminantes presentes en los recortes de perforación base agua y así poder definir las medidas correctivas necesarias para poder disminuir las concentraciones de los contaminantes por debajo de los límites máximos permisibles definidos en el DS. 2400. La línea base ambiental de ambas biopilas se encuentra detallada en la tabla 9. (Fernandez,2016).

Tabla 9.

Línea base ambiental de las biopilas.

Línea base ambiental de las Biopilas				
Análisis	Unidad	Límite máximo permisible	Biopila 1	Biopila 2
Características				
Materia seca	%(m/m)		69.6	50.2
Metales				
Arsénico	mg/kg	12	6.5	6.6
Cobalto	mg/kg	40	14	15
Molibdeno	mg/kg	5	1.9	1.8
Níquel	mg/kg	50	33	28
Plomo	mg/kg	100	18	17
Hidrocarburos monoaromáticos				
Benceno	mg/kg	0.05	<0.050	<0.050
Tolueno	mg/kg	0.1	<0.050	<0.050
Etilbenceno	mg/kg	0.1	<0.050	<0.050
o-xileno	mg/kg		<0.050	<0.050
M, P-xileno	mg/kg		<0.050	<0.050
Xilenos	mg/kg	0.1	<0.10	<0.10
BTEX	mg/kg		<0.25	<0.25
TPH volátil				
TPH volátil C6-C8	mg/kg		<0.60	<0.60
TPH volátil >C8-C10	mg/kg		<0.60	<0.60
TPH volátil (C6-C10)	mg/kg		<1.2	<1.2
TPH				
TPH (C10-C12)	mg/kg		<3.0	<3.0
TPH (C12-C16)	mg/kg		<5.0	<5.0
TPH (C16-C21)	mg/kg		6.5	9.5
TPH (C21-C30)	mg/kg		31	26
TPH (C30-C35)	mg/kg		18	13
TPH (C35-C40)	mg/kg		<6.0	<6.0
TPH SUMA (C10-C40)	mg/kg	200	62	54
Hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAP				
Naftaleno	mg/kg	0.1	<0.010	<0.010
Acenaftileno	mg/kg	100	<0.010	<0.010
Acenafteno	mg/kg	15	<0.010	<0.010
Fluoreno	mg/kg	340	<0.010	<0.010
Fenantreno	mg/kg	40	0.013	0.017
Antraceno	mg/kg	28	<0.010	<0.010

Fluoranteno	mg/kg	40	0.012	0.019
Pireno	mg/kg	0.1	0.011	0.017
Benzo(a)antraceno	mg/kg	0.1	<0.010	0.017
Criseno	mg/kg	12	<0.010	0.017
Benzo(b)fluoranteno	mg/kg	12	<0.010	<0.010
Benzo(k)fluoranteno	mg/kg		<0.010	<0.010
Benzo(a)Pireno	mg/kg	0.1	<0.010	<0.010
Dibenzo(ah)antraceno	mg/kg	1.2	<0.010	<0.010
Benzo(ghi)perileno	mg/kg	40	<0.010	<0.010
Indeno(123cd)pireno	mg/kg		<0.010	<0.010
HAP 10VROM (suma)	mg/kg		<0.10	<0.10
HAP 16 EPA (suma)	mg/kg		<0.16	<0.16

Nota: En la tabla observamos la línea base ambiental de las biopilas adaptada de: (Fernandez,2016)

Etapas del tratamiento

1. Preparación del terreno: se prepararon fosas de recepción de acuerdo al volumen de cortes a tratar. (Fernandez,2016).
2. Recepción de cortes contaminados: se procedió a la descarga de los recortes de perforación para proceder a esparcirlos en capas delgadas de 30 a 50 cm de grosor como se muestra en la figura 17. (Fernandez,2016).



Figura 17. Fosa de recortes. Tomado de (Fernandez,2016).

3. Mantenimiento de la humedad: durante el tratamiento se mantuvo el porcentaje de humedad de las biopilas en aproximadamente un 40% por medio de aspersores y/o mangueras, esto fue de vital importancia para conseguir un desarrollo exitoso del proyecto debido a que la humedad permite un crecimiento de bacterias y así mismos microorganismos puedan alimentarse de los contaminantes de los recortes de perforación. (Fernandez,2016).
4. Laboreo de celdas y conformación de biopilas: El laboreo se realizó para airear el suelo e incorporar el residuo en la matriz del suelo. Mediante el laboreo se incrementó el contacto microorganismos, nutrientes y contaminantes, así se mejoró la biodegradación. En el laboreo y volteo de suelo también se redistribuyó el contaminante, produciéndose una mejor homogeneidad en los niveles de contaminación. La razón primordial para el laboreo es el incremento de la tasa de difusión de oxígeno, que es necesario para la degradación aerobia, y que disminuye a profundidades superiores a 30 cm, dependiendo de la estructura del suelo y de su textura. La frecuencia de laboreo de la celda se realizó con intervalos de 3 días. (Fernandez,2016).

en las figuras 18 y 19 se muestra como se hizo el proceso de esparcido y secado de los cortes.



Figura 18. Extendido de los recortes sobre la superficie. Tomado de (Fernandez,2016).



Figura 19. Secado de los recortes. Tomado de (Fernandez,2016).

5. Monitoreo ambiental: Para el monitoreo de la celda de biorremediación se tomó una línea base de tratamiento, la misma indica el grado de contaminación del contaminante a monitorear (TPH). (Fernandez,2016).

Una vez establecida la línea base, fue necesario esperar un ciclo de degradación biológica, estimado en tres meses, posteriormente al ciclo de degradación biológica en la cual los microorganismos habían comenzado su actividad microbiana degradando el material contaminado, se realizó un muestreo para sus respectivos análisis de laboratorio de los parámetros de TPH (hidrocarburos totales de petróleo), microbiológico cuyo objetivo era de interpretar la curva de crecimiento microbiano y de actividad bacteriana. (Fernandez,2016).

En el anexo 1 de este documento se muestra el ANEXO 7 del D.S. N° 2400 tabla 7.3.4, son los límites máximos permisibles para suelos en función del uso actual o potencial del Reglamento Ambiental para el Sector de Hidrocarburos (RASH), en el cual se registró el tratamiento aplicando la técnica biopila mecanizada. Por lo tanto, se deberá realizar los siguientes análisis de laboratorio:

- TPH (Hidrocarburos totales de petróleo)
- BTEX, Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos.
- PAHS, Hidrocarburos Poliaromáticos.
- Metales Pesados.
- Microbiológico.
- pH Quincenal.
- Temperatura.
- Conductividad Eléctrica (contenido de sales).
- Humedad. (Fernandez,2016).

6. Monitoreo: El ultimo monitoreo de las biopilas se efectuó en fecha 22-03-2016 donde se vuelve a verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles para suelo agrícola, ya que los terrenos donde se llevó a cabo el tratamiento de los recortes serían destinados a la actividad agrícola (figura 19). Los resultados de laboratorio obtenidos se pueden verificar en la tabla 10 de este documento. (Fernandez,2016).



Figura 20. Toma de muestras buzón N°16. Tomada de (Fernandez,2016).

7. Resultados: Al término de la degradación biológica mediante la técnica de biopila mecanizada, y una vez verificado que el suelo contaminado se encontraba dentro del valores permisibles de los parámetros monitoreados (reportes de análisis de laboratorio) se procedió a la disposición final, para tal efecto se realizó:

- Disposición final del suelo tratado en el buzón N° 1.
- Disposición final del suelo tratado en el buzón N° 10.

Una vez se hizo la disposición de los suelos tratados en los buzones 1 y 10 se firmó las actas de conformidad con los propietarios de estos terrenos, dando por culminado el manejo de estos residuos. (Fernandez,2016).

Tabla 10.

Resultados obtenidos en el tratamiento de los recortes de perforación provenientes del pozo LQC-X1.

Parámetro	Unidad	Métodos de ensayo	Límite de cuantificación	Límites permisibles	Resultados obtenidos
TPH	mg/kg	EPA-418.1	1	200	134
Metales					
Arsénico	mg/kg	ICP-MS	5	12	6.3
Cobalto	mg/kg	ICP-MS	2	40	6.3
Molibdeno	mg/kg	ICP-MS	1.5	5	2
Níquel	mg/kg	ICP-MS	2	50	16
Plomo	mg/kg	ICP-MS	10	100	12
BTEX					
Benceno	mg/kg	HS-GC-MS	0.05	0.05	<0.05
Tolueno	mg/kg	HS-GC-MS	0.05	0.1	<0.05
Etilbenceno	mg/kg	HS-GC-MS	0.05	0.1	<0.05
Xileno	mg/kg	HS-GC-MS	0.05	0.1	<0.05
PAHS					
Naftaleno	mg/kg	GC-MS	0.01	4.6	0.02
Acenaftileno	mg/kg	GC-MS	0.01	100	<0.01

Acenafteno	mg/kg	GC-MS	0.01	15	<0.01
Fluoreno	mg/kg	GC-MS	0.01	340	0.02
Fenantreno	mg/kg	GC-MS	0.01	40	0.1
Antraceno	mg/kg	GC-MS	0.01	28	0.01
Fluoranteno	mg/kg	GC-MS	0.01	40	0.02
Pyreno	mg/kg	GC-MS	0.01	250	0.06
Benzo (a) antraceno	mg/kg	GC-MS	0.01	6.6	0.02
Chryseno	mg/kg	GC-MS	0.01	12	0.13
Benzo (b) fluoranteno	mg/kg	GC-MS	0.01	12	0.03
Benzo (a) Pyreno	mg/kg	GC-MS	0.01	1.2	<0.01
Indenopyreno	mg/kg	GC-MS	0.01	12	0.01
Dibenzo (a, h) antraceno	mg/kg	GC-MS	0.01	1.2	<0.01
Benzo (g, h, i) perileno	mg/kg	GC-MS	0.01	40	0.02

Nota: Límites permisibles según el DS 2400 que tiene por objeto complementar y modificar para el reglamento ambiental para el sector de hidrocarburos en Bolivia. Adaptado de (Fernández, 2016).

Por medio de este ejemplo podemos comprobar que las técnicas biológicas sirven para reducir el riesgo de lixiviación de componentes orgánicos, pero se sigue manteniendo la preocupación con los componentes inorgánicos que son nocivos para el medio ambiente y para la salud humana.

9. Impactos ambientales

9.1 Lixiviados, generación y composición

Podemos definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los cortes de perforación y que extrae materiales disueltos o en suspensión. Las precipitaciones hacen que una cierta cantidad

de agua entre a los lugares donde se disponen los residuos sólidos, estas aguas al filtrarse lixivian en solución compuestos orgánicos e inorgánicos. El lixiviado se produce cuando las características absorbentes del medio son excedidas produciéndose la percolación del fluido.

La composición de los lixiviados depende de la composición de los cortes de perforación. Estudios realizados en laboratorios han demostrado que químicamente de los cortes de perforación tiene una amplia variedad de constituyentes tóxicos como el aluminio, arsénico, antimonio, cromo, bario, cadmio, cobre, mercurio, magnesio, plomo, benceno, zinc, níquel, fenantrena, naftalina entre otros hidrocarburos, sodio y cloruro en niveles tóxicos. así mismo los lixiviados van a arrastrar consigo parte de estos constituyentes tóxicos.

9.2 Impactos ambientales de los cortes de perforación

El desarrollo de este proyecto de investigación va enfocado hacia la identificación de los impactos ambientales que se pueden desencadenar por los residuos procedentes de la etapa de perforación en un proyecto petrolero. Podemos definir impacto ambiental como el cambio en el ambiente ocasionado por las actividades del hombre o por la misma naturaleza.

Todas las actividades que lleva a cabo nuestra industria poseen impactos potenciales, es decir, son impactos que pueden o no materializarse. La gravedad de los impactos generados depende del tamaño del proyecto que se esté llevando a cabo, la sensibilidad del ambiente, la efectividad de la planeación del proyecto, así como también de la prevención de la contaminación y las técnicas de control y mitigación de impactos.

Una vez se comienza la etapa de perforación se empiezan a producir los residuos contaminantes, dichos residuos son una mezcla de rocas cuya composición depende de la estratología del suelo incluyendo metales pesados, sustancias radiactivas, hidrocarburos y otros elementos contaminantes; además de esto los lodos empleados contienen una gran cantidad de aditivos químicos que terminan formando parte de la composición de los residuos generados.

En los casos donde se realiza recolección de lixiviados también pueden presentarse problemas debido a que los recolectores pueden fallar al taponarse con barro o fango, por el desarrollo de microorganismos, por reacciones químicas que generan debilitación del mismo o simplemente por la presión de los recortes sobre ellos (Environmental Research Foundationb,1989) lo que conlleva a la filtración de lixiviados a lugares diferentes a los destinados para su recolección lo que causa grandes impactos en las zonas aledañas.

Los principales impactos ambientales derivados de la generación potencial de lixiviados de cortes de perforación afectan directa e indirectamente el suelo, las aguas, la fauna y la flora del medio en el cual se haga la disposición de estos residuos, así como también a las comunidades que se encuentran cercanas a estas áreas. Los compuestos hidrocarburos presentes en el corte afectan las capas superficiales del suelo, pueden ser movilizados hasta aguas subterráneas generando su contaminación y también pueden ser transportados por escorrentía aumentando el impacto ambiental.

9.2.1 Impacto al suelo. Se entiende como suelo a la capa superficial de la tierra que se ha formado muy lentamente a través del tiempo, formada por minerales, vegetales, organismos animales pequeños, aire y agua. Todos estos componentes son muy importantes para mantener un equilibrio adecuado del ecosistema.

La contaminación del suelo por hidrocarburos y otros contaminantes presentes en los cortes de perforación produce condiciones adversas en el suelo generando el deterioro de la estructura del suelo, mermando la cantidad de materia orgánica, nutrientes y minerales, lo cual se traduce en pérdida de fertilidad y degradación del suelo generando consecuencias perjudiciales para los seres humanos y el ecosistema en general.

Las precipitaciones pueden generar lixiviación de material orgánico o inorgánico que podría contaminar otros suelos cercanos a los lugares de disposición y/o tratamiento de los recortes de perforación.

Nuestro país cuenta con una gran variedad de suelos debido a factores climáticos y relieves, por esto es muy importante prevenir cualquier tipo de contaminación al suelo pues cada lugar tiene unas características de humedad, pH, temperatura y tipo de suelo diferentes y no se puede aplicar un mismo tratamiento para todos los casos de contaminación ya que todos son distintos.

9.2.2 Impacto a las aguas. Cuando estos lixiviados son arrastrados hasta cuerpos de agua superficiales y/o subterráneos, los hidrocarburos presentes por diferencia de densidades con el agua, comienzan a ubicarse en la superficie del cuerpo de agua bloqueando el intercambio de gases, alterando el pH, salinidad, alcalinidad y bloqueando la entrada de luz en caso de aguas superficiales ocasionando cambios en el ambiente químico y bioquímico del medio y dándole características no aptas para el consumo. La capa de petróleo superficial reduce el contenido de oxígeno en el agua afectando la vida en el medio acuático, el contenido mínimo de oxígeno en el agua es de 5mg/l, valores menores a este aumentan la presión en el medio acuático, valores de contenido de oxígeno en el agua menores a 1 o 2 mg/l pueden causar la muerte de peces. (Lamingo, J., Moreno, V., 2014)

Algunos componentes de estos lixiviados pueden ser solubles en el agua, como por ejemplo los hidrocarburos livianos del petróleo y como consecuencia directa de esto, los componentes solubles pueden llegar a ser transportados a grandes distancias en los cuerpos de agua corriendo de esta

manera el riesgo de contaminar otros medios acuáticos de los cuales estos acuíferos y/o ríos son afluentes.

9.2.3 Impacto a la flora y a la fauna. La contaminación de los suelos por los lixiviados imposibilita el crecimiento de las plantas debido a la alteración que ha sufrido el mismo, causando así la deforestación y desertificación de algunas zonas, el exterminio de las especies vegetales afecta en general todo el ecosistema debido a que se produce migración y/o extinción de especies de la zona por la falta de alimentación, es decir, se produce la alteración de los ciclos biogeoquímicos.

En medios acuáticos como se dijo anteriormente, el hidrocarburo impide la penetración de la luz en el agua lo cual dificulta u obstruye por completo el proceso de fotosíntesis produciendo así la muerte de plantas acuáticas que sirven de alimento para algunos organismos y acabando con la oxigenación del medio lo cual acarrea también la muerte de otros organismos animales en el agua.

La contaminación del agua con hidrocarburos y componentes tóxicos de los lixiviados produce la muerte de peces, aves y mamíferos puesto que el hidrocarburo se adhiere al cuerpo de los animales impidiendo el aislamiento térmico, el movimiento y otras funciones vitales como la respiración produciendo la muerte por asfixia, también puede generarse muerte por intoxicación por la ingesta del agua contaminada lo cual afecta directamente el sistema digestivo y puede generar alteraciones genéticas en los animales.

9.2.4 Impacto a las comunidades. Las comunidades se ven afectadas por la contaminación sobre el suelo, agua, la extinción, disminución y desplazamiento de especies, así como también por la desertización de las tierras. Los impactos nombrados anteriormente afectan directamente a las comunidades por que debido a estos las personas pueden presentar inconvenientes que les afectara

su forma de vida cotidiana, entre muchas afectaciones se encuentra la perdida de cultivos debido a las afectaciones sufridas en los suelos, así como también efectos sobre la salud por el consumo humano de aguas contaminadas.

9.2.3 Impacto al aire. Otro de los impactos que se tienen durante el tratamiento de los cortes de perforación es el impacto hacia la atmosfera pues algunos de los tratamientos antes mencionados tiene la desventaja de generar emisiones de gases (vapor de agua, CO₂, CH₄, HAPS, N₂O, COVS (compuestos orgánicos volátiles), entre otros), estas emisiones de componentes contaminantes volátiles hacia el aire afectan directamente la capa de ozono y contribuyen al cambio climático, además, si estas emisiones no son controladas pueden producir repercusiones en la zona afectando la poblaciones de aves y animales terrestres que se encuentran en el área.

9.3 Evaluación de impactos ambientales

Para la evaluación de impactos ambientales utilizaremos el método ARBOLEDA EPM desarrollado en la ciudad de Medellín en el año 1986 por la unidad de planeación de recursos naturales de las empresas públicas de Medellín, para ellos es necesario establecer los siguientes parámetros de evaluación. (Arboleda, 2008).

9.3.1 Clase (C). Parámetro que define el cambio ambiental que genera una actividad o proyecto y puede ser:

- Positivo (+), si se observa mejoría de la condición ambiental.

- Negativo (-), si se observa una desmejora de la condición ambiental (Arboleda, 2008).

9.3.2 Presencia (P). Evalúa la certeza o la posibilidad de que se va a presentar un determinado impacto. La probabilidad se expresa en porcentajes de la siguiente forma:

- Cierta (100%), se califica con 1.
- Muy probable (70 – 100 %), se califica entre 0.7 – 0.99.
- Probable (40 – 70 %), se califica entre 0.4 – 0.69.
- Poco probable (20 – 40%), se califica entre 0.2 – 0.39.
- Muy poco probable (0 – 20 %), se califica entre 0.01 – 0.19. (Arboleda, 2008).

9.3.3 Duración (D). Este criterio evalúa el tiempo activo del impacto, desde el momento en que se comienzan a manifestar sus consecuencias hasta que duren los efectos sobre el medio.

- Permanente, si es mayor a 10 años se califica con 1.
- Larga, entre 7 y 10 años se califica entre 0.7 – 0.99.
- Media, entre 4 y 7 años se califica entre 0.4 – 0.69.
- Corta, entre 1 y 4 años se califica entre 0.2 – 0.39.
- Muy corta, menor a un año se califica entre 0.01 – 0.19. (Arboleda, 2008).

9.3.4 Evolución (E). Califica la rapidez con la que avanza el impacto a partir del momento en que inician las afectaciones y hasta que el impacto se materializa plenamente en todas sus consecuencias.

- Muy rápida, si el tiempo menor a 1 mes se califica con 1.
- Rápida, entre 1 y 12 meses se califica entre 0.7 – 0.99.

- Media, entre 12 y 18 meses se califica entre 0.4 – 0.69.
- Lenta, entre 18 y 24 se califica entre 0.2 – 0.39.
- Muy lenta, si el tiempo es mayor a 24 meses se califica entre 0.01 – 0.19. (Arboleda, 2008).

9.3.5 Magnitud (M). Evalúa la dimensión o tamaño del cambio sufrido en el factor ambiental analizado y se expresa en porcentaje de afectación.

- Muy alta (>80%), se destruye o cambia totalmente se califica con 1.
- Alta (60 – 80 %), se modifica parcialmente el factor analizado se califica entre 0.7 – 0.99.
- Media (40 – 60 %), se modifica medianamente y se califica entre 0.4 – 0.69.
- Baja (20 – 40%), la afectación es baja y se califica entre 0.2 – 0.39.
- Muy poco probable (<20 %), la modificación es mínima y se califica entre 0.01 – 0.19. (Arboleda, 2008).

9.3.6 Calificación ambiental del impacto (Ca). Es la expresión de la acción conjugada de los criterios con los cuales se calificó el impacto ambiental y representa la gravedad o importancia de la afectación que se está causando y se determina a través de la siguiente formula que incluye todos los parámetros anteriores. (Arboleda, 2008).

$$Ca = C[P[(E * M) + D]]$$

Donde:

Ca: calificación ambiental del impacto

C: Clase

P: presencia

E: evolución

M: magnitud

D: duración

Dependiendo del valor de la calificación ambiental del impacto se determina si estos son irrelevantes, moderados, relevantes, graves según la tabla 11.

Tabla 11.

Clasificación de la importancia de los impactos de acuerdo al valor de la calificación ambiental.

Calificación ambiental	Importancia del impacto ambiental
≤ 2.5	Irrelevante
$>2.5 \text{ y } \leq 5$	Moderado
$>5 \text{ y } \leq 7.5$	Relevante
>7.5	Grave

Nota: Los valores presentados en esta tabla ayudan a clasificar la importancia del impacto ambiental de los aspectos evaluados. (Arboleda, 2008).

9.4. Matriz de impactos ambientales derivados de la generación potencial de lixiviados de cortes de perforación.

Se realizó una matriz para definir la importancia de los impactos ambientales generados al suelo, agua, flora y fauna acuática, flora y fauna terrestre, aire y comunidades como se puede observar en la tabla 12.

Tabla 12.

Matriz de impactos ambientales derivados de la generación de lixiviados de cortes de perforación.

Matriz de impactos ambientales									
Componente biótico o abiótico	Impacto ambiental	C	P	E	D	M	Ca		Importancia del impacto ambiental
							-	+	
Suelo	Alteración del pH	-	0.9	0.6	1	0.8	6.024		R
	Pérdida de la fertilidad	-	1	0.7	0.8	0.8	6.32		R
	Degradación del suelo	-	1	0.7	0.9	0.8	6.62		R
	Contaminación por inorgánicos	-	1	0.8	0.8	0.7	6.32		R
	Reducción del uso de suelo productivo	-	0.8	0.5	0.8	0.5	3.8		M
	Aumento de la erodabilidad	-	0.6	0.5	0.8	0.5	3.45		M
	Contaminación por hidrocarburos	-	1	0.8	0.8	0.7	6.32		R
	Deterioro de la estructura del suelo	-	1	0.7	0.8	0.5	4.85		M
	Contaminación por componentes orgánicos	-	1	0.8	0.8	0.7	6.32		R
Agua	Contaminación por hidrocarburos	-	1	0.8	0.7	0.8	6.58		R
	Bloqueo del proceso de intercambio de gases	-	1	0.8	0.7	0.6	5.46		R
	Alteración del pH	-	1	0.8	0.7	0.8	6.58		R
	Alteración de la salinidad	-	1	0.8	0.7	0.8	6.58		R
	Alteración de la alcalinidad	-	1	0.8	0.7	0.8	6.58		R
	Contaminación por inorgánicos	-	1	0.8	0.7	0.8	6.58		R
	Contaminación por componentes orgánicos	-	1	0.8	0.7	0.8	6.58		R
Flora y fauna terrestre	Perdida de vegetación	-	0.9	0.4	0.8	0.8	4.416		M
	Deterioro en la composición y estructura de la flora	-	0.7	0.6	0.8	0.5	3.87		M
	Exterminio de especies vegetales nativas	-	0.3	0.6	1	1	4.26		M
	Migración de especies animales	-	0.5	0.4	0.8	0.5	3.1		M
	Muerte de especies animales	-	0.8	0.4	1	1	5.24		R
	Extinción de animales nativos	-	0.3	0.4	1	1	3.84		M
	Alteraciones genéticas de especies	-	0.1	0.2	1	1	3.14		M

Flora y fauna acuática	Perdida de vegetación	-	0.7	0.6	0.8	0.8	4.752	M
	Deterioro en la composición y estructura de la flora	-	0.7	0.6	0.8	0.5	3.87	M
	Exterminio de especies vegetales nativas	-	0.6	0.7	1	1	5.94	R
	Migración de especies animales	-	0.7	0.6	0.8	0.8	4.752	M
	Muerte de especies animales	-	0.8	0.6	1	1	6.36	R
	Extinción de animales nativos	-	0.7	0.6	1	1	5.94	R
	Alteraciones genéticas de especies	-	0.5	0.2	1	1	3.7	M
	Olores indeseables	-	1	1	0.5	0.3	3.6	M
Aire	Emisión de gases	-	1	1	0.8	0.5	5.9	R
	Aumento de ruido	-	1	1	0.5	0.5	5	M
	Generación de material particulado	-	0.3	0.1	0.5	0.2	1.542	I
	Olores indeseables	-	1	1	0.5	0.3	3.6	M
Impacto a las comunidades	Alteración de la forma de vida	-	1	0.3	1	0.5	4.05	M
	Perdida de las actividades características de la región (cultivo, ganadería, caza)	-	0.8	0.7	0.7	0.5	4.06	M
	Disminución del agua apta para consumo	-	0.8	0.8	0.9	0.7	5.836	R
	Desplazamiento de población	-	0.5	0.2	0.5	0.5	1.85	I
	Generación de nuevas enfermedades	-	0.3	0.1	0.5	0.2	1.542	I

Nota: En la matriz se presenta un resumen de los impactos generados por la lixiviación potencial de contaminantes en los cortes de perforación. Se realiza una evaluación de cada uno de los parámetros y se determina el grado de importancia de cada uno de ellos. Las siglas (I, M y R) en esta matriz indican que la importancia del impacto es (irrelevante, moderada y relevante) respectivamente. (Arboleda, 2008).

10. Conclusiones

La normatividad colombiana, en el marco de la gestión integral de los residuos peligrosos es rigurosa procurando el cuidado, protección del medio ambiente, el bienestar de las comunidades y el desarrollo sostenible. Por consiguiente, obliga a las compañías a cumplir con los lineamientos estipulados en ella, haciéndolos responsables de estos residuos hasta que sean aprovechados o dispuestos de manera definitiva y segura, de igual forma, en caso de que la compañía contrate a un agente externo para tratar estos residuos, las responsabilidades sobre estos residuos le son otorgadas inmediatamente a la compañía receptora. Se precisa la continua actualización y modernización de estas leyes y normas, debido a que en la búsqueda de nuevas tecnologías de tratamiento pueden manifestarse impactos que no están contemplados en la normatividad legal vigente.

Las tecnologías que existen cuando el corte de perforación u otro desecho incumple con el análisis de lixiviados varían en función del compuesto que lixivía. En caso de emergencia por lixiviación, se puede aplicar la tecnología de estabilización química y solidificación como un recurso rápido para mitigar la contaminación.

De acuerdo con el análisis técnico económico realizado a los tratamientos para cortes de perforación más utilizados en la industria a nivel nacional e internacional, podemos concluir que las tecnologías más atractivas para las compañías petroleras son las de biorremediación debido su bajo costo, eficiencia de tratamiento de orgánicos y reducción de impactos en comparación con las tecnologías térmicas y químicas, sin embargo, estas tecnologías se ven limitadas a la hora de tratar componentes inorgánicos, para estos componentes la industria debe innovar con el fin de desarrollar tecnología efectivas para su tratamiento y eliminación debido a que estos presentan un

alto riesgo de contaminación o implementar la combinación de tecnologías que haga posible la eliminación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos.

Las tecnologías actuales mitigan el impacto de los lixiviados sobre el medio, pero no eliminan por completo el riesgo. El reto de la industria en cuanto al tratamiento y disposición de los cortes de perforación está en la creación de una nueva tecnología que elimine por completo los contaminantes de los cortes de perforación inmediatamente estos se disponen para su tratamiento en superficie, evitando la lixiviación de estos contaminantes por factores climáticos adversos, una tecnología que no transforme el impacto al suelo en impacto a otros componentes bióticos o abióticos, y además una tecnología que sea económicamente accesible para las compañías.

Se evidenció que gran cantidad de los impactos ambientales derivados de la generación potencial de lixiviados de cortes de perforación tienen una calificación relevante según el método para la evaluación de impactos ARBOLEDA EPM, por lo que se debe tener un especial cuidado a la hora de realizar los tratamientos para evitar al máximo la lixiviación de contaminantes.

11. Recomendaciones

Las metodologías existentes en la industria petrolera para el manejo de cortes de perforación se ven limitadas a la hora de realizar la descontaminación de los recortes, debido a que ninguna es eficiente para tratar contaminantes orgánicos e inorgánicos a la vez y a corto plazo, para ello se recomienda evaluar la combinación de técnicas biológicas y químicas para el tratamiento de cortes, por ejemplo: Bioestimulación para la eliminación de orgánicos y solidificación/estabilización para la inmovilización de inorgánicos.

Realizar un seguimiento a las empresas por parte de los gestores ambientales exigiendo la entrega de los planes de manejo ambiental y los planes de contingencia en caso de presentarse lixiviación, así como también, los informes ambientales y las certificaciones del cumplimiento de la reglamentación y la normatividad para la disposición y tratamiento de recortes.

Esclarecer el proceso al que son sometidos los lixiviados de cortes de perforación una vez estos son recogidos a través de los sistemas de recolección de lixiviado de algunas tecnologías.

Realizar por parte de las autoridades ambientales y las empresas petroleras un seguimiento para evaluar la afectación y/o beneficio de las comunidades con los proyectos de disposición y tratamiento de los recortes de perforación.

Referencias bibliográficas

- Alarcón, J. (2014). Criterios básicos para normar los recortes de perforación generados por la industria petrolera en el estado de Veracruz (Tesis especialización). Universidad Veracruzana, Xalapa, México.
- Alonso, R. (2012). Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos (tesis de pregrado y especialización). Universidad Autónoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallés.
- Arboleda, J. (2008). Manual para la evaluación del impacto ambiental de proyectos, obras o actividades. Medellín, Colombia.
- Argote, C., y Martínez, J. (2011). Comparación técnica del método ENDRILL con los métodos convencionales de tratamiento de cortes de perforación (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Bolaños, V. (2014). Disposición ambiental de los cortes de solidos asociados a la perforación de pozos petroleros aplicando la reinyección de cortes de perforación en el bloque 16 del oriente ecuatoriano (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
- Colombia, Decreto 1076 de 2015 (26 de mayo 2015). Recuperado de http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/Decreto%201076%20de%202015.pdf
- Colombia, Decreto 2811 de 1974, Diario Oficial No. 32.243 (27 de enero de 1975). Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf

- Colombia, Decreto 4741 de 2005 (30 diciembre de 2005). Recuperado de <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/1524/02-28/Decreto4741de2005.pdf>
- Colombia, ley 1252 de 2008 (27 de noviembre de 2008). Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Leyes_/ley_1252_271108.pdf
- Colombia, Ley 23 de 1973, Diario Oficial No. 34.001 (17 de enero de 1974). Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/ley_23_de_1973.pdf
- Colombia, Ley 9 de 1979, Diario Oficial No. 35308 (16 de Julio de 1979). Recuperado de https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/LEY%200009%20DE%201979.pdf
- Colombia, Ley 99 de 1993, Diario Oficial No. 41.146 (22 de diciembre de 1993). Recuperado de https://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/colombia/colombia_99-93.pdf
- Colombia, Resolución 1402 (17 de julio de 2006). Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Resoluciones/res_1402_140706.pdf
- Colombia, Resolución 2309 de 1986 (febrero 24 de 1986). Recuperado de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Resolucion-2309-de-1986.pdf>
- De Basilea, C. (1992). Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Recuperado de [http://www.basel.14\(04\),2006](http://www.basel.14(04),2006).
- Estados Unidos, Norma 29B del estado de Lousiana (diciembre de 2008).
- Estados Unidos, Norma 29B del estado de Lousiana (septiembre de 1999).
- Fernández, C. (2016). Manejo y disposición de los recortes de perforación (tesis de pregrado). Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Santa Cruz, Bolivia.

- Fernández, C. (2016). Manejo y disposición de los recortes de perforación. (tesis de pregrado). Universidad Autónoma Gabriel René Moreno. Santa Cruz, Bolivia.
- Forero, A. (2016). Evaluación de diferentes sistemas de lodos de perforación para disminuir el daño de formación en un crudo pesado (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- ICONTEC, (1997). Norma técnica colombiana. Gestión ambiental. Tratamiento de los cortes producidos durante la perforación de pozos de petróleo con lodo base aceite. Fijación con cal viva. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2007). Análisis de metales pesados resolución 0062/07 del IDEAM. Bogotá DC.
- INECC (2007). Tecnologías de remediación. Ciudad de México. Recuperado de: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html?fbclid=IwAR2BomkIJ0pt1oQ85JN8r_b58ijjwh8w8SEgTi4yEIB6PilBUUgnxn0x7Xs
- Lizarazo, J., y Leal, C. (2011). Estudio para la implementación de reinyección de cortes durante la perforación de pozos (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Maroto, M. E., y Rogel, J. M. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. GEOCISA. Div. Protección Ambiental de Suelos. Recuperado de: <http://aguas.igme.es/igm>
- Méndez, R. Gomes, P. Ledesma, J. y Cenicero, C. (20013). Manejo integral de los recortes de perforación en la industria petrolera en Tabasco. Revista Iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias.
- MI SWACO. Drilling fluids engineering manual. Houston, Texas. 2001.

- Ortiz, J. (2004). Estudio de la estabilización y solidificación de metales pesados mediante la técnica de cementación (tesis de pregrado). Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México.
- Ponce, D. (2014). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos (tesis de pregrado). Universidad del Bio-Bio. Concepción, Chile.
- Ramírez, L., Rubio, M., y Toro, M. (2006). Manual de procedimientos para el manejo de cortes y fluidos de perforación (tesis de especialización). Universidad Industrial de Santander, Bogotá, Colombia.
- Rivera, P., Rivera, J., Andrade, E., Heyer, L., De la garza, F. y Castro, B. (2017). Bioestimulación y biorremediación de cortes de perforación contaminados con hidrocarburos. Tamaulipas, México.
- US EPA. (1992). Method 1311. Toxicity characteristic leaching procedure. EPA SW-846: test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods.