

ANÁLISIS PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS LODOS
GENERADOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS MEDIANTE LA
RECUPERACIÓN DE LODOS EN BASE ACEITE Y EL PROCESO DE
BIORREMEDIACIÓN EN COLOMBIA

LILIAM ALEXANDRA CAMARGO BARACALDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2013

ANÁLISIS PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS LODOS
GENERADOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS MEDIANTE LA
RECUPERACIÓN DE LODOS EN BASE ACEITE Y EL PROCESO DE
BIORREMEDIACIÓN EN COLOMBIA

LILIAM ALEXANDRA CAMARGO BARACALDO

Monografía para optar el título de Especialista en Gerencia de Hidrocarburos

Director
Harving Díaz Consuegra
Ingeniero de Petróleos
Especialista en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA PETROLEOS
INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA
2013

*A mis padres y hermano
por ser mi apoyo incondicional, porque se han esforzado
para que cada día sea mejor persona, porque con su amor y dedicación me
enseñaron el camino para lograr todo lo que me proponga.*

*A Mauro porque con su amor
y apoyo no dejo que desfalleciera ayudándome a que este sueño
se hiciera realidad.*

*A mis familiares y amigos
que siempre me han acompañado y que aportaron enseñanzas
tanto profesionales como personales.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por hacer realidad este sueño y por el camino recorrido.

A la Universidad de Industrial de Santander por abirme las puertas de sus instalaciones, comprometiéndose con mi formación. De la misma manera nuestros agradecimientos a todos los docentes que la conforman por brindarnos sus conocimientos; sin ellos no hubiésemos llegado a donde estamos.

Al Ingeniero Harving Díaz por haberme brindado la oportunidad de recurrir a sus conocimientos y experiencia como director del presente trabajo. Así mismo le agradezco por su asesoría, apoyo y paciencia pese a sus múltiples ocupaciones siempre tuvo la disposición para colaborarame.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. LODOS DE PERFORACIÓN	19
1.1 PROPIEDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN	19
1.1.1 Físicas	19
1.1.1.1 Densidad	19
1.1.1.2 pH	19
1.1.1.3 Punto cedente	19
1.1.1.4 Viscosidad API	19
1.1.1.5 % Arena	20
1.1.1.6 % Sólidos y líquidos	20
1.1.2 Químicas	20
1.1.2.1 Alcalinidad	20
1.1.2.2 Cloruros	20
1.1.2.3 Dureza	20
1.1.2.4 MBT (Methylene Blue Test)	21
1.2 CICLO DEL LODO EN EL POZO	21
1.3 FUNCIONES DEL LODO DE PERFORACIÓN	22
1.3.1 Evacuar los cortes de perforación	22
1.3.2 Controlar las presiones de la formación	23

1.3.3 Suspender y descargar los cortes	23
1.3.4 Obturar las formaciones permeables	23
1.3.5 Mantener la estabilidad del pozo	23
1.3.6 Minimizar los daños en la formación	23
1.3.7 Enfriar, lubricar y aliviar la columna de perforación	23
1.3.8 Transmitir energía hidráulica a herramientas y broca	24
1.3.9 Controlar la corrosión	24
1.3.10 Facilitar la cementación y la complementación	24
1.4 LODOS EN BASE ACEITE	24
1.5 MECANISMOS PARA LA RECUPERACIÓN DE LODOS EN BASE ACEITE	25
1.5.1 Reinyección cortes de perforación	25
1.5.2 Tecnología RECLAIM	28
2. BIORREMEDIACIÓN	31
2.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA BIORREMEDIACIÓN	33
2.1.1 Medio ambientales	33
2.1.1.1 Temperatura	33
2.1.1.2 Humedad	33
2.1.1.3 Necesidad de nutrientes inorgánicos	33
2.1.1.4 Oxígeno	34
2.1.1.5 pH	34
2.1.2 Factores físicos	35
2.1.2.1 Biodisponibilidad	35

2.1.2.2 Presencia de agua	35
2.1.3 Factores químicos	35
2.1.3.1 Estructura química	35
2.1.4 Factores microbiológicos	36
2.2 MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN	36
2.2.1 Bacterias	37
2.2.2 Hongos	38
2.2.3 Microorganismos usados para eliminar residuos de hidrocarburos	38
2.2.3.1 Rhodococcus	39
2.2.3.2 Pseudomonas	39
2.3 MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN	39
2.3.1 Según el lugar de realización	40
2.3.1.1 Biorremediación “in situ”	40
2.3.1.2 Biorremediación “ex situ”	41
2.3.2 Según el organismo utilizado	41
2.3.2.1 Remediación microbiana	41
2.3.2.2 Degradación enzimática	42
2.3.2.3 Fitorremediación	42
2.3.3 Según la técnica utilizado	43
2.3.3.1 Bioaumentación	43
2.3.3.2 Bioestipulación	44
2.3.3.3 Inoculación	44
2.3.3.4 Tratamiento en lechos o tratamiento vía sólida	44

2.3.3.5 Bioceldas o biopilas	46
2.3.3.6 Tratamiento de biosuspensión	47
2.3.3.7 Bioaireación o bioventeo	47
2.3.3.8 Inyección de aire a presión	48
2.4 PAUTAS A TENER EN CUENTA EN EL PROCESO DE BIORREMEDIACIÓN	49
2.4.1 Investigación y caracterización de la contaminación y del Emplazamiento	49
2.4.2 Análisis y elección de las medidas biocorrectivas	50
2.4.3 Diseño y evaluación del sistema	50
2.4.4 Control y seguimiento	51
2.4.5 Análisis e interpretación de resultados	51
3. ANÁLISIS PARA COLOMBIA	52
3.1 BIORREMEDIACIÓN DE ALFISOLES Y MOLISOLES	56
3.2 BIORREMEDIACIÓN DE ANDISOLES	56
3.3 BIORREMEDIACIÓN DE ARIDISOLES Y ENTISOLES	56
3.4 BIORREMEDIACIÓN DE INCEPTISOLES	57
3.5 BIORREMEDIACIÓN DE ULTISOLES	58
3.6 BIORREMEDIACIÓN DE OXISOLES	59
4. CONCLUSIONES	61
5. BIBLIOGRAFÍA	62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Tipos de suelos y condiciones ambientales de las regiones Colombianas	55

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ciclo del lodo en el pozo	21
Figura 2. Tratamiento de los cortes de perforación para ser inyectados	26
Figura 3. Formas de CRI	27
Figura 4. Unidad de tratamiento RECLAIM	29
Figura 5. Procesamiento para la recuperación de fluidos de perforación	30
Figura 6. Apariencia bacterias	37
Figura 7. Clasificación “in situ” y “ex situ”	40
Figura 8. Procesos de fitodescontaminación y fitoestabilización	43
Figura 9. Pautas a tener en cuenta en la biorremediación	49

GLOSARIO

ANDISOLES: el material original lo constituyen fundamentalmente cenizas volcánicas, son suelos de regiones con temperatura media anual superiores a 0°. Se encuentran en áreas onduladas o montañosas de las regiones húmedas. Tienen una textura fina, aunque su contenido arcilloso no pasa de 20 a 25%, pobre en arenas, estructura muy porosa y permeabilidad elevada.

ALFISOLES: suelos que se desarrollan en climas que tienen períodos áridos; por lo tanto, el perfil se presenta seco en parte del año. Se caracteriza por presentar un horizonte subsuperficial de enriquecimiento secundario de arcillas desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica, y asociado con un horizonte superficial claro, generalmente pobre en materia orgánica o de poco espesor.

BIODISPONIBILIDAD: es la fracción ingestada de un nutriente que está disponible para un organismo. Es decir, se refiere al porcentaje de los compuestos que dicho organismo consume y que pueda asimilar y utilizar en sus funciones biológicas normales.

CEMENTACIÓN: trabazón sólida de fragmentos clásticos sueltos mediante un cemento o pasta pétreo, generalmente arcillosa, ferruginosa, calcárea o silícea, que une los elementos alógenos de las rocas clásticas, tales como areniscas, conglomerados, brechas, pudingas, etc.

COMPOSTAJE: ciclo aeróbico (con alta presencia de oxígeno) de descomposición de la materia orgánica.

CORTES DE PERFORACION: fragmentos de roca que son cortados por la broca de un taladro de perforación de pozos.

DETRITO: material de meteorización y fragmentos rocosos de cualquier tipo. Los agentes móviles (por ejemplo, la soliflucción) los convierten en material móvil.

ENTISOLES: suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica (epipedón ócrico).

ESPODOSOLES: son suelos desarrollados en climas húmedos y fríos, en presencia de vegetación de bosque. Existencia de un horizonte de eluviación, espódico, en el cual se acumulan sustancias amorfas, tanto coloides orgánicos, como sesquióxidos de aluminio.

FITODEGRADACIÓN: consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación

FITOEXTRACCIÓN: implica la captación de contaminantes del suelo y su translocación hacia los tejidos de la planta, que finalmente se cosechan y tratan. El Ni y el Zn son los metales absorbidos más fácilmente.

HISTOSOLES: este Orden comprende a los suelos orgánicos, que tienen su origen en la producción de materia orgánica en forma más rápida que su mineralización, lo que ocurre comúnmente bajo condiciones de saturación con agua casi continua que restringe la circulación del oxígeno a través del suelo.

INCEPTISOLES: son suelos de regiones subhúmedas y húmedas que no han alcanzado a desarrollar caracteres diagnósticos de otros órdenes, suelos inmaduros que tienen débil expresión morfológica de los suelos maduros. Muestran horizontes alterados que han sufrido pérdida de bases, hierro y aluminio pero conservan considerables reservas de minerales meteorizables.

LODOS ACEITOSOS: material de consistencia acuosa con grandes contenidos de sólidos y altos porcentajes de humedad, su composición puede estar constituida por limos, arenas arcillas, agua y su mezcla con diferentes tipos de residuos de hidrocarburos de características fluidas.

MESÓFILA: bacteria que descompone la materia orgánica a temperaturas que oscilan entre 30 y 400°C

MOLISOLES: básicamente son suelos negros o pardos que se han desarrollado a partir de sedimentos minerales en climas templado húmedos a semiárido, aunque también se presentan en regímenes fríos y cálidos con una cobertura vegetal integrada fundamentalmente por gramíneas.

OXIGENASA: cualquier enzima que oxida un sustrato mediante la transferencia de oxígeno presente en el oxígeno molecular (O₂, como en el aire).

OXISOLES: estos suelos son conocidos por su presencia en selvas tropicales húmedas, 15 a 25° norte y sur del ecuador terrestre, siempre tienen color rojo o amarillo, debido a la alta concentración de hierro (III) y óxidos e hidróxidos de aluminio. Además contienen cuarzo y arcilla caolinita, más pequeñas cantidades de otros minerales de arcilla y de materia orgánica

PEROXIDASA: tipo de enzimas muy extendidas en toda la escala filogenética. Pertenecen a la categoría de las oxidoreductasas y según el Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de Bioquímica y Biología Molecular se clasifican con los números EC 1.11.

PROTEOBACTERIAS: son uno de los principales grupos de bacterias. Incluyen una gran variedad de patógenos, como *Escherichia*, *Salmonella*, *Vibrio*, *Helicobacter*, *Neisseria gonorrhoeae* y muchos otros.

PROTOPLASMA: es un citoplasma más el núcleo. Se encuentran las proteínas, entre otros componentes químicos.

RADIONUCLEIDOS: elementos químicos con configuración inestable que experimentan una desintegración radiactiva que se manifiesta en la emisión de radiación en forma de partículas alfa o beta y rayos X o gama.

RESIDUOS ACEITOSOS: material generado en el proceso de explotación, producción, tratamiento conducción, almacenamiento y transporte de hidrocarburos.

REOLOGÍA: estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

ULTISOLES: se desarrollan en climas con superávit de precipitación, pero con una estación parcialmente seca. Lo anterior los hace ser lixiviados y pobres en bases. Fuerte desequilibrio entre la cantidad de bases liberadas por meteorización y las bases removidas por lixiviación. La agricultura es imposible sin el uso de fertilizantes.

VERTISOLES: son suelos en donde hay un alto contenido de arcilla expansiva conocida como montmorillonita que forma profundas grietas en las estaciones secas. Se forman típicamente de rocas altamente básicas tales como basalto en climas estacionalmente húmedos o sujetos a sequías erráticas y a inundación.

XENOBIÓTICO: se aplica a los compuestos cuya estructura química en la naturaleza es poco frecuente o inexistente debido a que son compuestos sintetizados por el hombre en el laboratorio.

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PERFORACIÓN DE POZOS MEDIANTE LA RECUPERACIÓN DE LODOS EN BASE ACEITE Y EL PROCESO DE BIORREMEDIACIÓN EN COLOMBIA*

AUTOR: LILIAM ALEXANDRA CAMARGO BARACALDO**

PALABRAS CLAVES: BIORREMEDIACIÓN, LODOS EN BASE ACEITE, MICROORGANISMOS.

DESCRIPCION: Con la finalidad de aprovechar los lodos en base aceite; generados en la perforación de pozos, disminuir costos y contribuir al medio ambiente; la presente monografía muestra cómo se puede lograr mediante la recuperación de estos lodos y la biorremediación por medio de microorganismos.

En el presente trabajo se hace una breve descripción de lo que son los lodos de perforación, las propiedades de los mismo, el ciclo y la función de estos en el pozo. Posteriormente se centra esta monografía en los lodos en base aceite y los mecanismos para la recuperación de los mismos.

La siguiente etapa en el desarrollo de este trabajo se basó en dar a conocer lo que es la biorremediación, los factores que se deben tener en cuenta para el desarrollo de la misma y los diferentes microorganismos que pueden intervenir en esta.

Luego de ello se muestran los métodos de biorremediación y las etapas a tener en cuenta para la degradación de los desechos que quedan luego de la recuperación de los lodos en base aceite.

Finalmente se realiza un análisis para Colombia; mostrando la normatividad ambiental con la que se debe cumplir en cuanto a la protección, conservación, control y mejoramiento de los recursos naturales, enfocado al suelo. Posteriormente se muestran las diferentes clases de suelos que se encuentran en cada una de las regiones de este país y los tipos de biorremediación que se pueden aplicar según sus características.

* Monografía

** Escuela de Ingeniería de Petróleo. Especialización en Gerencia de Hidrocarburos. Director Ingeniero Harving Díaz Consuegra

SUMMARY

TITLE: ANALYSIS FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACT OF MUD GENERATED IN WELL DRILLING BY RECOVERY OIL BASED MUD AND THE PROCESS BIOREMEDIATION IN COLOMBIA*

AUTHOR: LILIAM ALEXANDRA CAMARGO BARACALDO**

KEYWORDS: BIOREMEDIATION, OIL BASED MUD, MICROORGANISMS.

DESCRIPTION: In order to take advantage of oil based muds; generated in well drilling, reduce costs and help the environment, this paper shows how this can be achieved through the recovery of sludge and the bioremediation by microorganisms.

This work provides a brief description of that are drilling muds, the properties thereof, the cycle and the role of these in the well. Subsequently this monograph focuses on oil based mud and mechanisms for the recovery thereof.

The next stage in the development of this work was based on make known that is the bioremediation, the factors to be taken into account for the development of thereof and the different microorganisms which of may be intervene in this.

After shown the bioremediation methods and stages to take account for the degradation of the waste remaining after the recovery of oil based mud.

Finally, an analysis for Colombia; showing environmental the regulations with which they must comply in the protection, the conservation, the control and the improvement of natural resources, focused on the soil. Subsequently shows the different kinds of soils that are found in each of the regions in this country and bioremediation types that can be applied according the its characteristics.

* Monograph

** School of Engineering of Petroleum. Specialization in Management of Hydrocarbon. Director Engineer Harving Díaz Consuegra

INTRODUCCIÓN

En Colombia se encuentran un sin número de sitios con diferentes niveles de impacto ambiental, resultado de la actividad petrolera. La industria petrolera aunque hace un gran esfuerzo por reutilizar los lodos generados en la perforación; aun así sigue quedando residuos de lodos, en los que el tratamiento de los mismos no es lo bastante eficiente para el daño ambiente que causa, ya que los procesos de reutilización y la descontaminación de los suelos donde se dejan los desechos finales no alcanza a cubrir todas las áreas donde se realiza que con el pasar del tiempo los hidrocarburos penetran el ecosistema siendo irreversible su recuperación.

La generación de lodos en grandes cantidades empieza al mismo tiempo que lo hace la perforación, siendo inevitable en la producción de los mismos en la explotación petrolera, algunos lodos contienen gran cantidad de tóxicos que pueden ser cancerígenos generando una amenaza a la salud pública; como lo son los hidrocarburos aromáticos. Aunque la generación de los lodos en base aceite sean inevitable, se pueden buscar alternativas para el mejor aprovechamiento de los lodos generados en la perforación siendo la reutilización de los mismos una muy buena opción, para lo cual en el presente documento se dan a conocer dos mecanismos que pueden ser muy útiles para las empresas petroleras.

Aunque se realice la reutilización de lodos de perforación siguen quedando desechos impactantes para el medio ambiente que deben ser tratados y la biorremediación es una buena alternativa para ello, en esta monografía se hace una revisión bibliográfica de la biorremediación y los métodos más conocidos de dicha técnica. Así mismo se dan pautas a tener en cuenta para el desarrollo de la biorremediación.

Por último se muestra la normatividad Colombiana en cuanto a la protección de los suelos, posterior a ello se muestran los diferentes tipos de suelos existen en Colombia y los diferentes métodos de biorremediación que se pueden aplicar según las características de dichos suelos.

1. LODOS DE PERFORACIÓN

El lodo de perforación es un líquido con propiedades reológicas controladas, que circula por la sarta del taladro, en bajada a través de la broca y vuelve a subir por el espacio anular hasta la superficie. Su función principal es de llevar a la superficie los pedazos pequeños de formaciones perforadas por el taladro los cuales están compuestos: por arcillas, lutitas, arenitas, carbonatos y haluros, los cuales están empapados por los lodos de perforación que se estén usando.

1.1 PROPIEDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN

Según el Instituto Americano del Petróleo (API) las propiedades de los lodos que se pueden mantener durante la perforación son físicas y químicas.

1.1.1 Físicas

1.1.1.1 Densidad. Es la propiedad del fluido que tiene por función principal mantener en sitio los fluidos de la formación. La densidad se expresa por lo general en lbs/gal, y es uno de los dos factores, de los cuales depende la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido. Durante la perforación de un pozo se trata de mantener una presión hidrostática ligeramente mayor a la presión de la formación, para evitar en lo posible una arremetida, lo cual dependerá de las características de la formación.

1.1.1.2 pH. El pH indica si el lodo es ácido o básico. La mayoría de los fluidos base acuosa son alcalinos y trabajan con un rango de pH entre 7.5 a 11.5. Cuando el pH varía de 7.5 a 9.5, el fluido es de bajo pH y cuando varía de 9.5 a 11.5, es de alto pH.

1.1.1.3 Punto cedente. Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener las propiedades del fluido una vez que entra en movimiento. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de formación.

1.1.1.4 Viscosidad API. Es determinada con el Embudo Marsh, y sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua. A la viscosidad embudo se le

concede cierta importancia práctica aunque carece de base científica, y el único beneficio que aparentemente tiene, suspender los cortes de formación en el espacio anular, cuando el flujo es laminar. Por esta razón, generalmente no se toma en consideración para el análisis riguroso de la tixotropía del fluido. Es recomendable evitar las altas viscosidades y perforar con la viscosidad embudo más baja posible, siempre y cuando, se tengan valores aceptables de fuerzas de gelatinización y un control sobre el filtrado. Un fluido contaminado exhibe alta viscosidad embudo

1.1.1.5 % Arena. La arena es un sólido no reactivo indeseable de baja gravedad específica. El porcentaje de arena durante la perforación de un pozo debe mantenerse en el mínimo posible para evitar daños a los equipos de perforación. La arena es completamente abrasiva y causa daño considerable a las camisas de las bombas de lodo.

1.1.1.6 % Sólidos y líquidos. El porcentaje de sólidos y líquidos se determina con una prueba de retorta. Los resultados obtenidos permiten conocer a través de un análisis de sólidos, el porcentaje de sólidos de alta y baja gravedad específica. En los fluidos base agua, se pueden conocer los porcentajes de bentonita, arcilla de formación y sólidos no reactivos de formación, pero en los fluidos base aceite, no es posible conocer este tipo de información, porque resulta imposible hacerles una prueba de MBT.

1.1.2 Químicas

1.1.2.1 Alcalinidad. La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Con los datos obtenidos de la prueba de alcalinidad se pueden estimar la concentración de iones OH^- , $\text{CO}_3^{=}$ y HCO_3^- , presentes en el lodo.

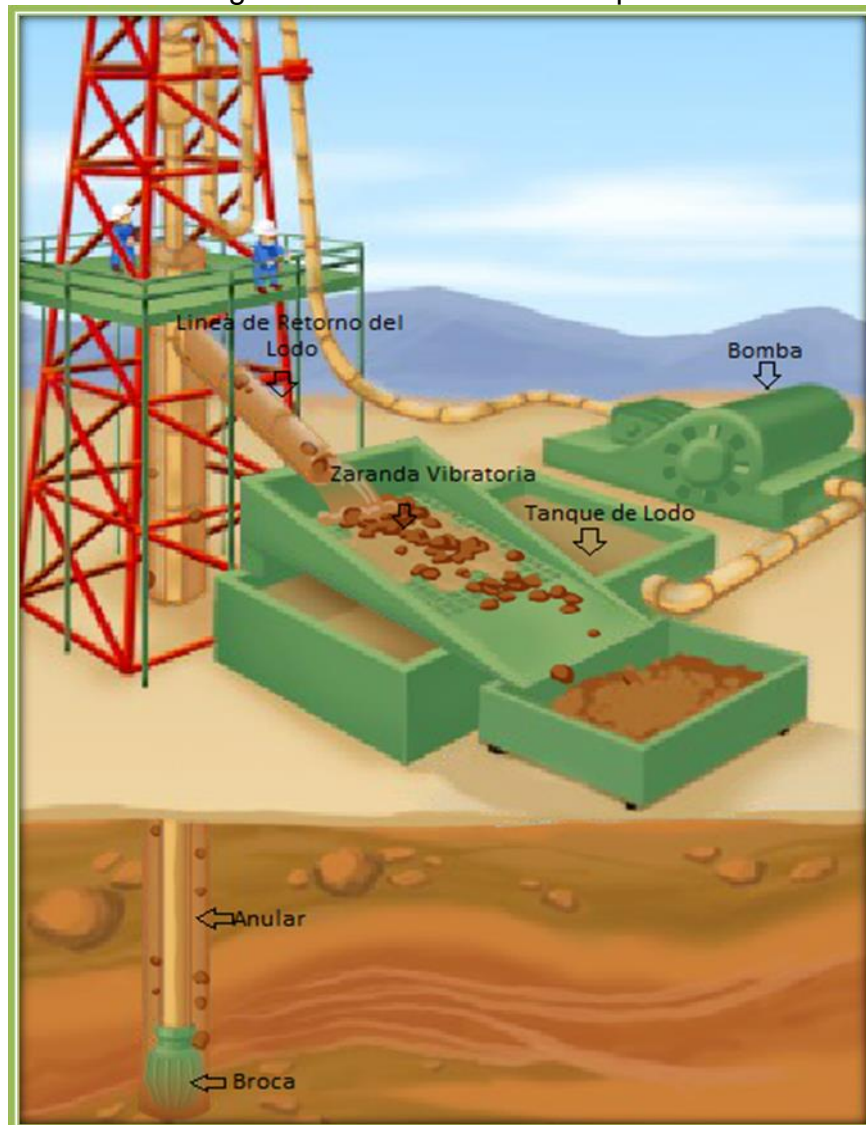
1.1.2.2 Cloruros. Es la cantidad de iones de cloro presentes en el filtrado del lodo. Una alta concentración de cloruros causa efectos adversos en un lodo base de agua.

1.1.2.3 Dureza. Es causada por la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua o en el filtrado del lodo. El calcio por lo general, es un contaminante de los fluidos base de agua.

1.1.2.4 MBT (Methylene Blue Test). Es una medida de la concentración total de sólidos arcillosos que contiene el fluido.

1.2 CICLO DEL LODO EN EL POZO

Figura 1. Ciclo del lodo en el pozo



Fuente: Elaboración Propia basado en [En línea] <<http://www.planetseed.com>>

- En la Figura 1 se puede observar como:
- El lodo se mezcla y se guarda en el **tanque de lodos**.

- Una **bomba** extrae el lodo del tanque y lo envía a través del centro hueco de la tubería de perforación directo hacia el pozo.
- El lodo sale a través de la tubería de perforación, desde el fondo del **pozo** donde la **broca** tritura la roca.
- Entonces el lodo comienza el viaje de regreso a la superficie, arrastrando los fragmentos de roca, denominados cortes de perforación, que se han desprendido de la formación por acción de la broca.
- El lodo sube a través del **anular**, el espacio que existe entre la tubería de perforación y las paredes del pozo. El diámetro típico de una tubería de perforación es de aproximadamente 4 pulgadas (10 centímetros). En el fondo de una excavación profunda, el pozo puede llegar a tener 8 pulgadas (20 centímetros) de diámetro.
- En la superficie, el lodo viaja a través de la línea de retorno de lodo, una tubería que conduce a la zaranda vibratoria.
- Las zarandas vibratorias son una serie de rejillas de metal que vibran y se utilizan para separar el lodo de los cortes de perforación. El lodo cae a través de las rejillas y regresa al **tanque de lodos**.
- Los cortes de perforación se deslizan por la **zaranda vibratoria** que se encarga de desecharlos. Según los factores medioambientales y otras consideraciones, los cortes deberán lavarse antes de desecharse, algunos de estos son examinados por geólogos que buscan indicios sobre qué es lo que está sucediendo en la profundidad del pozo¹.

1.3 FUNCIONES DEL LODO DE PERFORACION

1.3.1 Evacuar los cortes de perforación. La remoción de los cortes depende del tamaño, forma y densidad de los mismos, unidos a la velocidad de Penetración (ROP por sus siglas en inglés, Rate of penetration); de la rotación de la columna de perforación; y de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido de perforación.

¹ CIENCIAS DE TIERRA. Fluido de Perforación. Schlumberger Excellence in Educational Development.

1.3.2 Controlar las presiones de la formación. El fluido de perforación se prepara teniendo como finalidad de contrarrestar la presión natural de los fluidos en las formaciones. Se debe alcanzar un equilibrio, es decir, un equilibrio tal en el que la presión ejercida por el fluido de perforación (presión hidrostática) contra las paredes del pozo sea suficiente para contrarrestar la presión que ejercen los fluidos que se encuentran en las formaciones, el petróleo y el gas; pero que no sea tan fuerte que dañe el pozo. Si el peso del fluido de perforación fuese muy grande, podría provocar la fractura de la roca y el fluido de perforación se perdería hacia la formación.

1.3.3 Suspender y descargar los cortes. Los cortes de perforación que se sedimentan durante condiciones estáticas, pueden causar puentes y rellenos, los cuales por su parte pueden producir el atascamiento de la tubería o pérdida de circulación.

1.3.4 Obturar las formaciones permeables. Los sistemas de fluido de perforación deben estar diseñados para depositar sobre la formación un delgado revoque de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión de filtrado. Esto mejora la estabilidad del pozo y evita numerosos problemas de perforación.

1.3.5 Mantener la estabilidad del pozo. La estabilidad del pozo constituye un equilibrio de los factores mecánicos (presión y esfuerzo) y químicos. La composición química y las propiedades del lodo deben combinarse para proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento.

1.3.6 Minimizar los daños en la formación. La protección del yacimiento contra daños que podrían perjudicar la producción es muy importante. Cualquier reducción de la porosidad o permeabilidad natural de una formación productiva es considerada como daño a la formación. Estos daños pueden como resultado de la obturación causada por el lodo o los sólidos de perforación y mecánicas (conjunto de perforación) con la formación.

1.3.7 Enfriar, lubricar y aliviar la columna de perforación. La circulación del fluido de perforación enfría la broca y el conjunto de perforación, alejando el calor de la fuente (fricción) y distribuyéndolo en todo el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la columna de perforación hasta temperaturas más bajas que la temperatura de fondo. Además de enfriar el fluido de perforación lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor generado por la fricción. A mayor densidad del lodo, menor será el peso de la sarta en el gancho.

1.3.8 Transmitir energía hidráulica a herramientas y broca. La energía hidráulica puede ser usada para maximizar la velocidad de penetración y alimentar los motores de fondo que hacen girar la broca; medida mientras perfora (MWD por sus siglas en inglés, measurement while drilling). Los programas de hidráulica se basan en el dimensionamiento correcto de las boquillas de la broca para utilizar la potencia disponible (presión o energía) de la bomba a fin de maximizar la caída de presión en la broca u optimizar la fuerza de impacto del jet sobre el fondo del pozo. Esto se limita por la potencia disponible de la bomba, las pérdidas de presión dentro de la columna de perforación, la presión superficial máxima permisible y el caudal óptimo.

1.3.9 Controlar la corrosión. Los componentes de la sarta de perforación en contacto con los fluidos de perforación están propensos a varias formas de corrosión. Los gases disueltos tales como el O₂, CO₂ y H₂S pueden causar graves problemas de corrosión, tanto en la superficie como en el fondo del pozo. En general un pH bajo agrava la corrosión. Por lo tanto una función importante del fluido de perforación es mantener la corrosión a un nivel aceptable. El fluido de perforación no debería dañar los componentes de caucho o elastómeros.

1.3.10 Facilitar la cementación y el completamiento. El fluido de perforación se produce en un pozo dentro del cual la tubería de revestimiento pueda ser introducida y que no dificulte las tareas de completamiento. La cementación es crítica para el aislamiento eficaz de la zona y el completamiento exitoso del pozo. Durante la introducción de la tubería de revestimiento, el lodo debe permanecer fluido.

1.4 LODOS EN BASE ACEITE

Son aquellos cuya fase continua externa corresponde a petróleo, crudo, derivados o un aceite mineral. Son de gran utilidad en perforaciones con problemas de estabilidad de pozos por arcilla sensibles y perforación de pozos profundos a altas temperaturas y presiones. Los principales tipos de lodos en base aceite son:

- Base Diesel. El diesel la base del fluido, mezclado con una salmuera emulsionada, los cuales siguen siendo utilizados a pesar del alto contenido de hidrocarburos aromáticos y las preocupaciones de HSE, por el contenido aromático (componente cancerígeno), el cual es de aproximadamente el 80% del volumen.

- Emulsión Inversa. Tienen como base, aceite mineral con salmuera de cloruro de calcio, en proporción desde 5% a 50% de la fase líquida, el contenido aromático es menor al 10%.
- Base Aceite. Utilizando 100% de aceite como fluido base y son considerados ideales para la toma de núcleo o como fluido de perforación del yacimiento.
- Sintéticos. Tiene la misma formulación de los de emulsión inversa, pero el fluido base utilizado no contiene aromáticos (ésteres, éteres y/o parafinas)

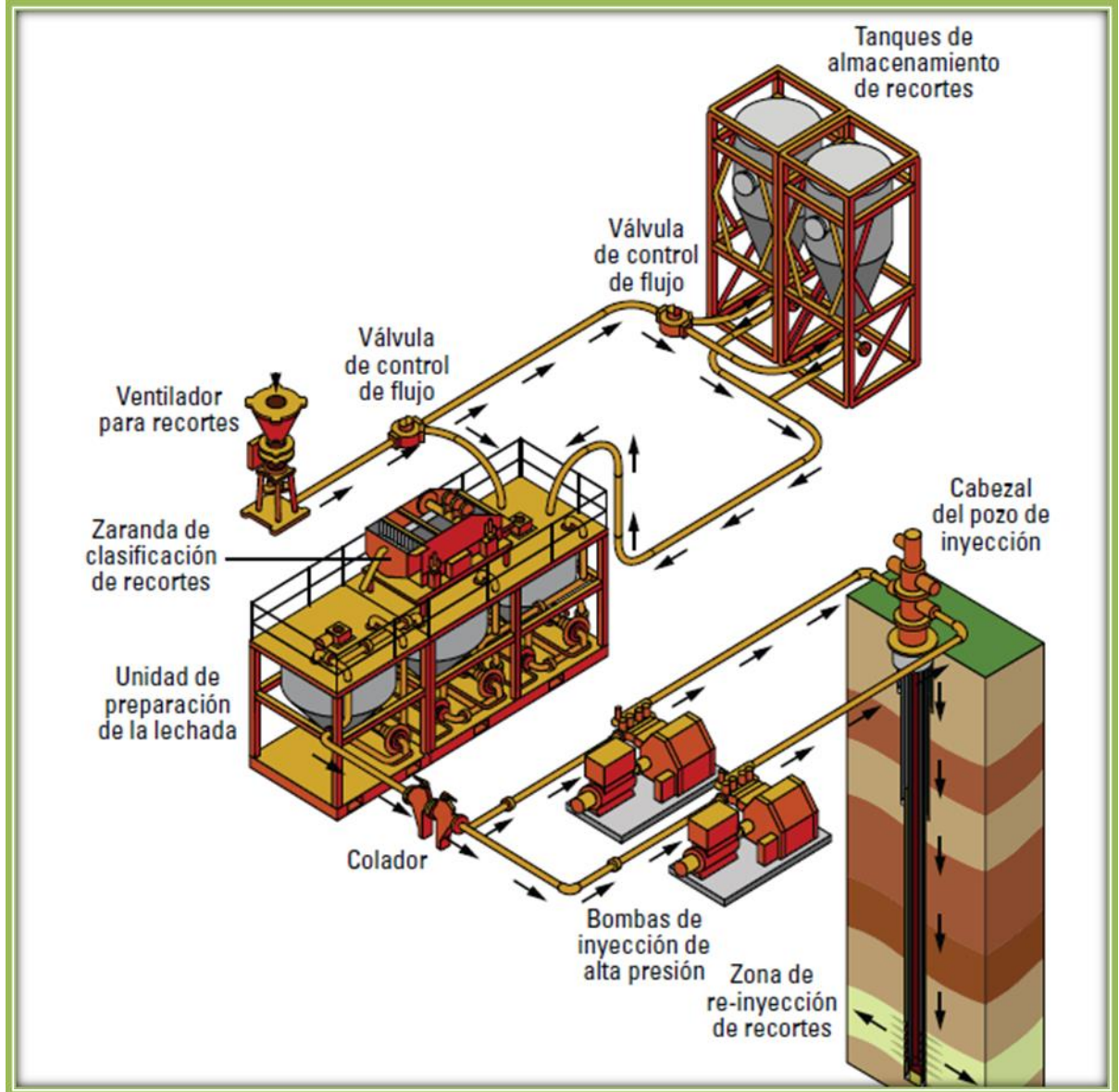
1.5 MECANISMOS PARA LA RECUPERACIÓN DE LODOS EN BASE ACEITE

1.5.1 Reinyección de cortes de perforación. La reinyección de cortes de perforación (CRI por sus siglas en inglés, Cutting Re-Injection) es un proceso donde los cortes son devueltos al subsuelo inyectándolos en una zona bien por debajo de la superficie terrestre la cual debe ser receptiva y estar permanentemente aislada a una profundidad segura.

La CRI minimiza el impacto sobre el medio ambiente, proporciona una solución económica para la eliminación de cortes y residuos de petróleo.

El flujo de lodos de perforación ayuda a desplazar los cortes desde el subsuelo hasta la superficie como ya se observó en la Figura 1. Ya estando en superficie estos deben ser separados del lodo antes que sea bombeado de nuevo al pozo, esto se hace por medio de zarandas vibratorias.

Figura 2. Tratamiento de los cortes de perforación para ser inyectados

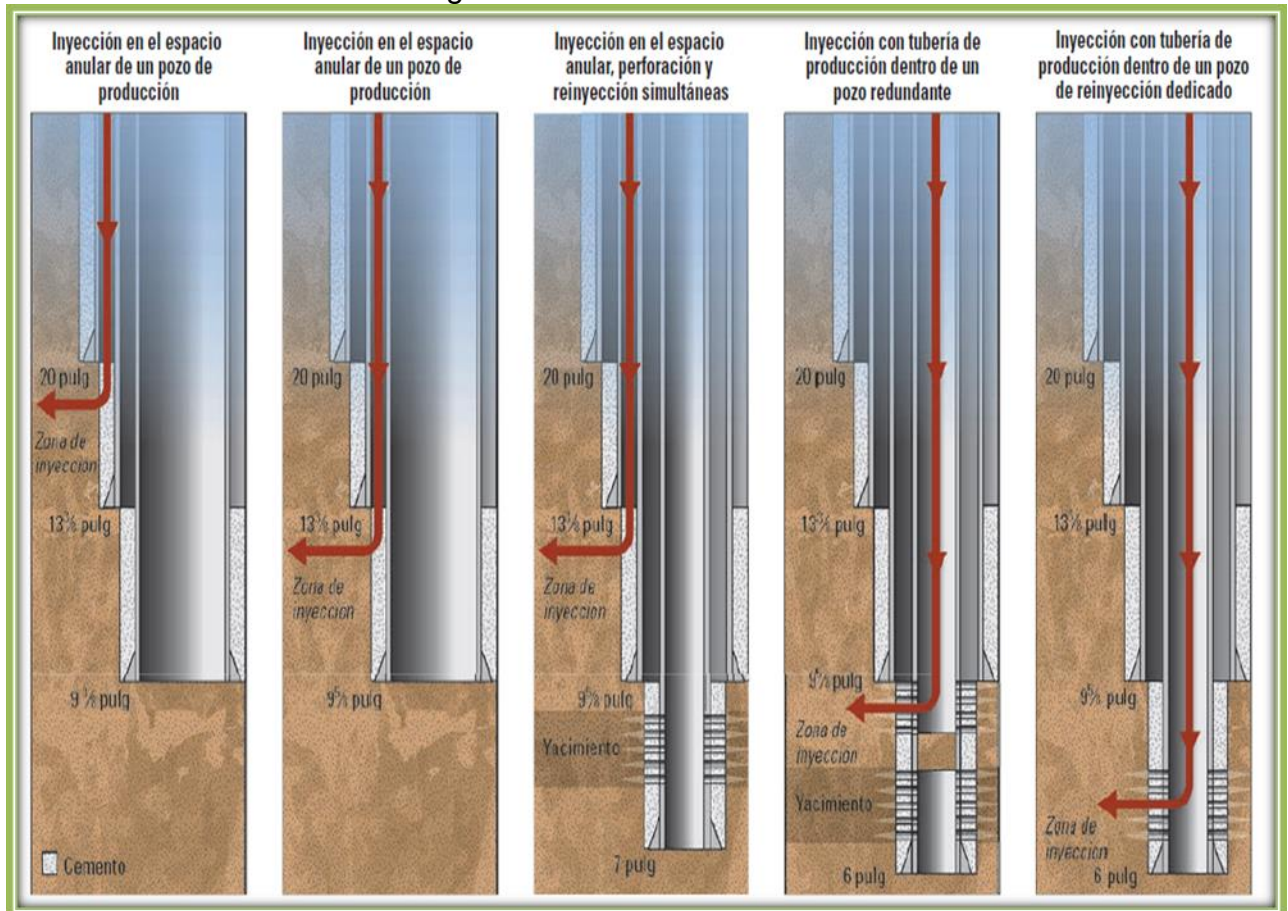


Fuente: Tecnología avanzada en el manejo de residuos de perforación

En la Figura 2 se observa una operación de CRI, que muestra como luego de recuperar los cortes son transportados alrededor del equipo de perforación mediante un sistema neumático, en ciertos casos estos pueden ser almacenados en cajas o tanques para su posterior tratamiento e inyección. Para realizar el procesamiento de los cortes estos son clasificados en una zaranda, posteriormente se prepara la lechada en donde los cortes son triturados; con el tiempo las partículas se vuelven más pequeñas y posteriormente son mezclados con agua para formar una lechada viscosa estable, que luego es bombeada en el pozo de inyección a altas presiones a través del espacio anular existente entre las

sartas de revestimiento en un pozo activo y se introducen bajo presión en las formaciones, como se muestra en la figura 3. En este proceso se crea una fractura hidráulica en la formación que contiene la lechada. Al terminar la inyección, el espacio anular del pozo se sella con cemento.

Figura 3. Formas de CRI



Fuente: Tecnología avanzada en el manejo de residuos de perforación

Antes de realizar cualquier proceso de reutilización o recuperación de cortes de perforación se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Se debe realizar un plan de manejo de residuos de perforación el cual generalmente debe implementarse antes de que empiece la perforación, para esto es muy importante modelar las incertidumbres y los riesgos para el diseño y la ingeniería CRI. Los riesgos pueden reducirse mediante la utilización de simuladores numéricos para modelar las incertidumbres.

- Se deben realizar estudios de factibilidad para identificar las posibles zonas de eliminación de residuos y la zona de contención de las fracturas.
- Se debe realizar un análisis de sensibilidad para ayudar a predecir la longitud de la fractura, el cual permite determinar que incertidumbre produce un mayor impacto sobre los resultados.
- A si mismo antes de realizar la inyección se deben realizar simulaciones para determinar el volumen de inyección de la lechada, el tiempo que podría dejarse la lechada en la tubería de inyección sin que los sólidos se condesaran y obturaran potencialmente el pozo que se está inyectando.
- Es importante conocer la reología de la lechada (viscosidad y resistencia indispensables para la suspensión), las características de suspensión de los sólidos, la concentración de solidos locales, la tasa de sedimentación de los cortes, la formación de capas, su deslizamiento y erosión y la acumulación de sólidos en el fondo del pozo.
- Se debe contar con un sistema para el monitoreo, diagnóstico para el control y aseguramiento de calidad CRI en tiempo real. El cual monitorea la reología, densidad, tasa de bombeo y presiones de inyección; estos datos se utilizan para asegurar que los parámetros operacionales estén dentro de los rangos especificados y sean simulados en la fase de planeación previa al pozo. Ayudando a detectar problemas potenciales y a reducir los riesgos.
- Se debe disponer de un simulador de transporte de cortes para pronosticar la estabilidad de la lechada y ayudar a mantener la inyectividad.
- También se puede utilizar un programa de diseño y evaluación de tratamientos de fracturamiento y otras herramientas de diagnóstico para proveer un análisis de presión más detallado.

1.5.2 Tecnología RECLAIM. Es un proceso de remoción de sólidos químicamente mejorado (RECLAIM por sus siglas en inglés, Regional Clean Air Initiatives Marker), con capacidad, para eliminar la mayoría de los sólidos finos de los fluidos no acuosos. Los sólidos finos o sólidos de baja densidad (LGS por sus siglas en inglés low gravity solids), se acumulan en un sistema de lodo durante el proceso de perforación obstaculizando las operaciones de perforación de distintas maneras: se incrementa el potencial de atascamiento de las herramientas, los niveles de esfuerzo de torsión pueden elevarse, la velocidad de penetración puede reducirse y el lodo puede experimentar otros problemas relacionados con el incremento de velocidad.

El equipo de control de la producción de sólidos remueve habitualmente las partículas de LGS de más de 5 a 7 micras, mientras que las partículas más pequeñas permanecen en el sistema de lodo. Conforme la concentración de estos sólidos finos continua incrementándose, el único recurso convencional consiste en diluir el sistema de lodo para reducir la concentración de LGS o generar lodo nuevo. La dilución o generación de más lodo incrementa los residuos y el costo total del proyecto de perforación

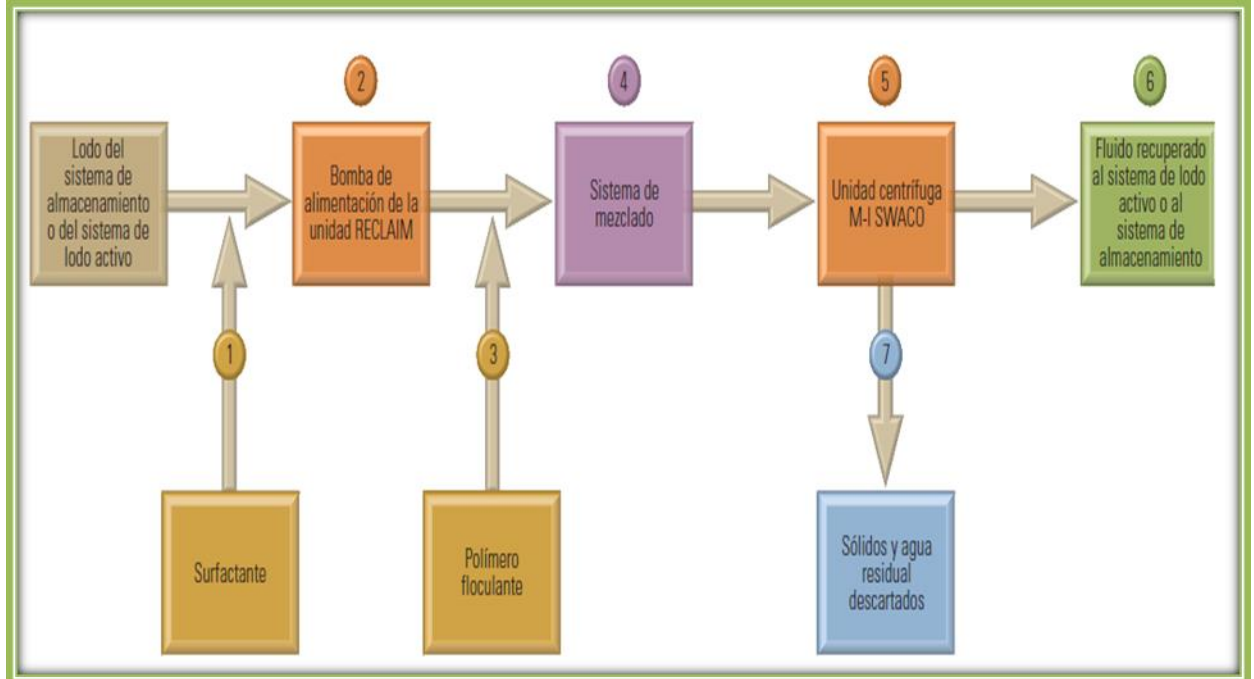
El sistema RECLAIM está diseñado para remover el grueso de las partículas coloidales finas y además puede ser utilizado para incrementar la relación agua/petróleo (RAP) del fluido de perforación. Esta tecnología comprende floculantes, surfactantes y un patín para la unidad RECLAIM que contiene todos los componentes requeridos para flocular efectivamente los sólidos finos en un fluido no acuoso, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Unidad de tratamiento RECLAIM



Fuente: Tecnología avanzada en el manejo de residuos de perforación

Figura 5. Procesamiento para la recuperación de fluidos de perforación



Fuente: Tecnología avanzada en el manejo de residuos de perforación

Como se observa en la Figura 5 a los fluidos de las operaciones de perforación activas o de localización de sólidos humedecidos con petróleo en suspensión, se les adiciona polímeros floculantes aglomerando los sólidos finos, se le inyecta un surfactante (reduce la estabilidad de la emulsión del lodo permitiendo que el polímero floculante se adhiera a los sólidos finos) con concentraciones predeterminadas y luego son transferidos a la bomba de alimentación de la unidad RECLAIM, las estaciones de aditivos y los sistemas de mezclado procesan el fluido al cual se le agrega el polímero floculante y lo preparan para la separación de los sólidos LGS y el agua del fluido base mediante la unidad centrífuga de alta velocidad. A partir de una corriente de alimentación única, el sistema devuelve tres fases: el petróleo base a ser devuelto al sistema activo o al sistema de almacenamiento, la fase acuosa del lodo a base aceite y una corriente de sólidos de desecho que es descartada para su eliminación. Este material de desecho contiene no solo los sólidos floculados sino además una porción de la fase acuosa. Si fuese necesario, es posible eliminar el grueso de la fase acuosa mediante el ajuste del nivel del tratamiento con polímeros. El exceso de polímero también se elimina, lo que asegura la generación de un fluido base no degradada, reutilizable, virtualmente libre de sólidos. A medida que los lodos en base aceite se gastan a través de la reutilización, los parámetros de desempeño se deterioran, en particular la velocidad de penetración (ROP).

2. BIORREMEDIACIÓN

Aunque existen algunas técnicas para reutilizar los lodos generados en la perforación como se observó en el capítulo anterior; aun así, siguen quedando residuos de hidrocarburos, a los cuales se les puede hacer un tratamiento como lo puede ser la biorremediación.

“La biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, y, por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas”².

Su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia (Atlas y Unterman, 1999):

- Sólido. Con aplicaciones sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, o bien directamente en lodos, residuos, etc.
- Líquido. Aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales.
- Gases. Emisiones industriales, así como productos derivados del tratamiento de aguas o suelos.

Se puede clasificar teniendo en cuenta los contaminantes con los que se puede trabajar:

- Hidrocarburos de todo tipo (alifáticos, aromáticos, BTEX, PAHs).
- Hidrocarburos clorados (PCBs, TCE, PCE, pesticidas, herbicidas).
- Compuestos nitroaromáticos (TNT y otros).
- Metales pesados. Estos no se metabolizan por los microorganismos de manera apreciable, pero pueden ser inmovilizados o precipitados.
- Otros contaminantes. Compuestos organofosforados, cianuros, fenoles, etc.

Los microorganismos transforman y metabolizan aeróbicamente los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono, agua y fuentes de

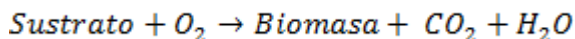
² GLAZER, A.N. y NIKAIDO, H. Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology. W. H. Freeman and Company, New York 1995.

alimento para sustentar su crecimiento y reproducción, es decir, la biodegradación ocurre naturalmente. Es conocido que los microorganismos de natural ocurrencia tienen la capacidad de adaptarse y eventualmente degradar cualquier compuesto orgánico naturalmente; pero para ello se requiere la presencia de condiciones ambientales apropiadas tales como el pH, temperatura, el aceptor final de electrones (que en procesos aeróbicos es el oxígeno), concentraciones de contaminante no tóxicas para los microorganismos y adecuadas condiciones de humedad y conductividad del medio, entre las más importantes. “La ausencia de alguna o varias de las anteriores condiciones puede limitar parcial o totalmente la actividad biológica y es cuando la mano del hombre juega un papel fundamental en la optimización del proceso, ya sea mejorando estas condiciones para aumentar la población de microorganismos (bioaumentación) y/o manipulando genéticamente los microorganismos para la degradación específica de algunos compuestos químicos”³.

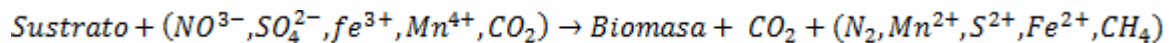
La biorremediación se lleva a cabo por medio de reacciones de óxido-reducción. La cadena la inicia un sustrato orgánico que para este caso es un compuesto de hidrocarburos que es externo a la célula y que actúa como donador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia

Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio como se muestra a continuación:

Degradación aerobia:



Degradación anaerobia:



³ DIAZ CONSUEGRA, Harving. “Revisión de los procesos de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, aplicados en Colombia” Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1999

2.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación, se puede realizar como una alternativa para la etapa final para tratar los residuos de hidrocarburos que hayan quedado luego de realizar técnicas de recuperación ya antes mencionadas, intervienen varios factores tales como: medio ambientales, físicos, químicos y microbiológicos.

2.1.1 Medio ambientales. Son aquellos que proporcionan las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos que llevan la degradación de los residuos de hidrocarburos. Los microorganismos son muy sensibles a los cambios de:

2.1.1.1 Temperatura. Es uno de los factores que más se debe tener en cuenta por la manera en la que influye en la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación. Las especies bacterianas crecen en un intervalo de T° de 15°C a 45°C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40°C e inhibiéndose a inferiores a 0°C. Sin embargo, también se ha dado la biodegradación de hidrocarburos a temperaturas extremas.

2.1.1.2 Humedad. Los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el área a tratar (el rango varía en función de la técnica).

Por lo anterior, la humedad del suelo puede limitar de forma severa la biodegradación, fundamentalmente en suelos superficiales afectados por oscilaciones importantes en el contenido de agua. No obstante el nivel óptimo de humedad depende de las propiedades de cada suelo, el tipo de contaminación y si la biodegradación es aeróbica o anaeróbica.

2.1.1.3 Necesidad de nutrientes inorgánicos. Los metabolismos microbianos están orientados a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los principales nutrientes requeridos son N y P, por tanto, las concentraciones asimilables de dichos elementos presentes en el suelo, suelen ser limitantes para un incremento y activación de la población microbiana, mientras que otros nutrientes esenciales como el Ca^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} y SO_4^{2-} ya están presentes en cantidades suficientes. Si se le adiciona fuentes inorgánicas de N y

P, generalmente puede incrementar las poblaciones microbianas y las tasas de biodegradación de hidrocarburos en áreas contaminadas.

Las proporciones molares de C:N:P, respecto al contenido de carbono a degradar son muy distintas; el rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1. Aunque en general la adición de fuentes inorgánicas de N y P al suelo es beneficiosa para los procesos de biodegradación, de igual manera, el uso excesivo de nutrientes inorgánicos también puede inhibir los procesos de biodegradación (Zhou y Crawford, 1995; Margesin y Schinner, 1997; Genouw *et al.*, 1994).

Para evitar el exceso de nutrientes, así como la pérdida de los mismos por lixiviación, también se han utilizado fertilizantes inorgánicos oleofílicos de liberación lenta (Inipol EPA® 22) para la biorremediación. (Lindstrom *et al.*, 1991; Pritchard y Costa, 1991) Además es importante destacar que la acción de los nutrientes inorgánicos puede estar limitada debido a la interacción química con los minerales del suelo. (el amonio se puede unir a las arcillas por intercambio catiónico y el fosfato puede unirse y precipitar con iones calcio, hierro y aluminio) (Morgan y Watkinson, 1992).

2.1.1.4 Oxígeno. Los microorganismos, oxidan compuestos orgánicos o inorgánicos, obteniendo así la energía necesaria para su crecimiento. El proceso de oxidación da lugar a electrones que intervienen una cadena de reacciones en el interior de la célula y, al final, deben ser vertidos en el entorno. El aceptor final de electrones es el receptor de los mismos y, en el caso de un metabolismo aerobio, O₂ es el aceptor y H₂O es el producto.

La mayor parte de hidrocarburos presentes en los productos petrolíferos son degradados con mayor extensión y rapidez de forma aeróbica (O₂ como aceptor final de electrones), ya que en ausencia de O₂, y en presencia de aceptores de electrones alternativos (NO³⁻, SO₄²⁻, CO₂, Mn⁴⁺ y Fe³⁺) los hidrocarburos pueden ser degradados, pero con unas tasas de biodegradación muy inferiores a las aeróbicas (Holliger y Zehnder, 1996; Grishchenkov *et al.*, 2000; Boopathy, 2002; Massias *et al.*, 2003).

2.1.1.5 pH. Influye significativamente en la actividad microbiana, cuanto mayor sea la diversidad de microorganismos existentes, potencialmente mayor será el rango de tolerancia. No existen unas condiciones preestablecidas que sean óptimas en todos los casos, pero en términos generales el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8. En general, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutro (pH 6 - 8), mientras que es más ácido para los hongos (pH 4 - 5). El pH óptimo establecido para procesos de biodegradación es neutro (pH 7,4 - 7,8) (Dibble y Bartha, 1979).

2.1.2 Factores físicos. Los de mayor importancia en la biorremediación son la biodisponibilidad y la presencia de agua.

2.1.2.1 Biodisponibilidad. La relación entre la tasa de degradación que depende tanto de la capacidad de transporte y del metabolismo microbiano, como de la transferencia de masas del compuesto, se conoce como biodisponibilidad. Uno de los factores limitantes para la biodegradación es la transferencia de masas, ya que los microorganismos de las áreas contaminadas, suelen tener amplias capacidades biodegradativas al estar expuestos a una gran variedad de compuestos orgánicos diferentes. Por lo tanto la adsorción, la absorción, desadsorción, disolución y la difusión son fenómenos, propios de la transferencia de masas, que condicionan la biodisponibilidad de los contaminantes (Stucki y Alexander, 1987; Tabak *et al.*, 1994 y 1995; Harms *et al.*, 1996; Bosma *et al.*, 1997). Un fenómeno que afecta de forma negativa a la biodisponibilidad de los contaminantes es el envejecimiento o *ageing* que se define como la pérdida de la biodegradabilidad de los compuestos a lo largo del tiempo en el suelo (aunque la población microbiana mantenga intacto su potencial catabólico), el cual es más importante en suelos con elevado contenido en materia orgánica (Huesemann, 1995; Nocentini, 2000; Breedveld y Sparrevik, 2001).

2.1.2.2 Presencia de agua. Ésta es necesaria ya que, como se ha visto con anterioridad, los microorganismos toman el carbono orgánico, los nutrientes inorgánicos y los aceptores de electrones, necesarios para el crecimiento microbiano, de la fase líquida. Por lo tanto, el agua debe estar en contacto con los contaminantes y estar presente en cantidades que permitan el desarrollo de las comunidades microbianas. Sin embargo, el agua puede llegar a inhibir el flujo de aire y reducir el suministro de oxígeno necesario para la respiración microbiana. Existen valores de humedad óptima para biorremediación de terrenos no saturados, que habitualmente están entre 150 y 250 cm³ de agua por kg de terreno seco.

2.1.3 Factores químicos. El factor químico más importante en la biorremediación es la estructura molecular del contaminante, cómo ésta afecta a sus propiedades químicas y físicas y su capacidad para ser biodegradado. La capacidad para ser biodegradado está relacionada con factores tales como la solubilidad, el grado de ramificación, el grado de saturación y la naturaleza y el efecto de los sustituyentes.

2.1.3.1 Estructura química. La biodegradabilidad de un hidrocarburo depende, en gran medida, de su estructura molecular. Siendo los parámetros que

más van a afectar la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica.

De las distintas familias de hidrocarburos del petróleo, los *n*-alcanos y los alcanos ramificados (isoprenoides) de cadena intermedia (C₁₀-C₂₀) son los sustratos más fácilmente degradables por los microorganismos del suelo, y que por lo tanto tienden a ser eficazmente biodegradados. Sin embargo, los alcanos de cadena larga (>C₂₀) son más difíciles de degradar debido a su elevado peso molecular y a su baja solubilidad en agua (Chaîneau *et al.*, 1995).

Los cicloalcanos, por norma general, se degradan más lentamente que los *n*-alcanos y alcanos ramificados. De igual forma, los HAPs que contienen de 2 a 3 anillos aromáticos pueden ser biodegradados eficazmente en el suelo en condiciones ambientales óptimas, mientras que los HAP de 4 anillos, y especialmente, los de 5 o más anillos bencénicos presentan una mayor recalcitrancia inherente y una baja solubilidad (Kästner, 2000). Las fracciones de resinas y asfaltenos son las que presentan una menor degradabilidad debido a las complejas estructuras químicas y al elevado peso molecular de sus moléculas (Harayama *et al.*, 1997, 1999).

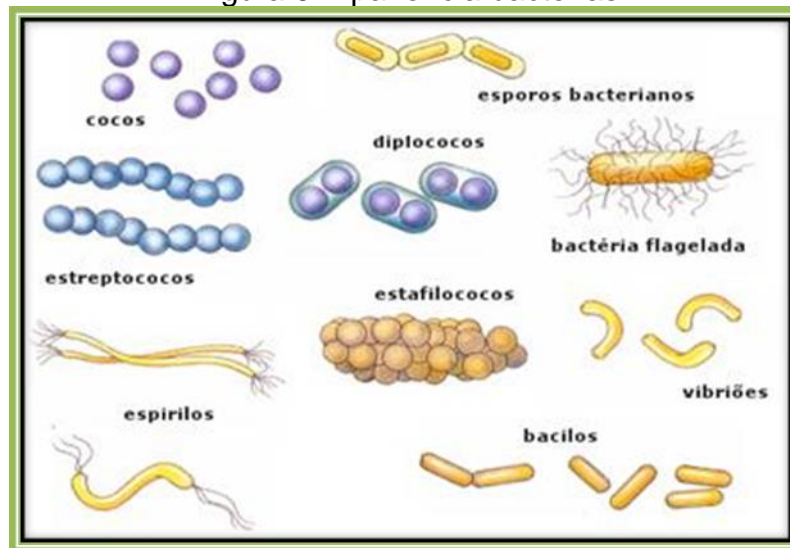
2.1.4 Factores microbiológicos. Sin duda alguna el factor microbiológico más importante en la biorremediación es la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por acción de las enzimas. La biodegradación de un compuesto específico es frecuentemente un proceso que se realiza paso a paso en el cual se involucran muchas enzimas y muchos organismos. Las enzimas son específicas en términos de los compuestos que atacan y las reacciones que catalizan. Más de una enzima es normalmente requerida para romper una sustancia orgánica. Frecuentemente, los organismos que tienen las enzimas para degradar están presentes en el suelo.

2.2 MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN

Existen diferentes tipos de microorganismos tanto eucariotas (algas, hongos, protozoos) como procariotas (bacterias y arqueas), además de encontrar virus y bacteriófagos. El suelo es un ambiente muy apropiado para el desarrollo de estos organismos. Siendo los microorganismos de gran importancia en los procesos de biorremediación; las bacterias casi siempre son los degradadores primarios, aunque en algunas ocasiones los hongos juegan un papel importante. Las bacterias desempeñan el papel de mayor importancia en la biodegradación de contaminantes orgánicos en suelos; los hongos también metabolizan compuestos orgánicos pero no son tan eficientes como las bacterias.

2.2.1 Bacterias. Son el grupo de organismos más abundante en los suelos y la cantidad de especies presentes en el mismo parece relativamente constante alrededor del mundo. Dichos organismos son un grupo diverso con variaciones extensivas en las propiedades morfológicas, ecológicas y fisiológicas y son los principales degradadores de compuestos orgánicos naturales y xenobióticos encontrados en el suelo. Las más comunes son *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Vibrio*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium* y *Flavabacterium*. Por su diversidad, las bacterias se encuentran regularmente en comunidades heterogéneas; algunas especies son degradadores primarios, es decir, ellas inician la degradación de la materia orgánica en el suelo; otras crecen en compuestos resultantes de la degradación parcial de complejos orgánicos o productos residuales de degradadores primarios.

Figura 6. Apariencia bacterias



Fuente: Agentes Patógenos, [En línea] <<http://evolucionzero-cebetis7.blogspot.com>>

Como se puede observar en la Figura 6, las bacterias tienen tres apariencias físicas generales:

- Esféricas (cocos)
- Forma de bastones (bacilos)
- Forma de espiras (espirilos)

Y se clasifican usando sus características físicas, químicas, genéticas y metabólicas.

El uso y tolerancia al oxígeno es uno de los métodos más generales de clasificación de las bacterias. Los aerobios estrictos son bacterias que requieren oxígeno como aceptor final de electrones y crecen solamente en presencia del mismo. Las aerobias facultativas son bacterias que pueden utilizar aceptores de

electrones terminales alternativos y crecer en presencia o ausencia de oxígeno. Algunas anaerobias son tolerantes al oxígeno, pero éste es tóxico a muchas anaerobias estrictas. Las bacterias también se pueden clasificar como eutrofas, las cuales crecen en presencia de altas concentraciones de sustratos, y oligotrofas, las cuales crecen con concentraciones trazas.

Los actinomicetos son un grupo intermedio entre las bacterias procariotas más primitivas y los hongos eucariotas; éstos están presentes en un gran número de suelos. Toleran un intervalo amplio de pH y temperatura, crecen bajo condiciones limitadas de nutrientes y son resistentes a desecación. Aunque su tasa de crecimiento es más baja que la de las bacterias, la habilidad de los actinomicetos para crecer en condiciones adversas permiten a estos predominar cuando las condiciones del medio son difíciles. Algunas bacterias son capaces de formar esporas cuando las condiciones de crecimiento son muy adversas, como cuando el suelo está seco o cuando los nutrientes están limitados. Las esporas son muy resistentes al calor y no son fáciles de destruir por radiación u otros factores químicos tales como ácidos y desinfectantes. Las bacterias formadas de esporas son muy comunes en suelos donde las condiciones pueden ser muy variables.

2.2.2 Hongos. Los hongos son altamente protistas, no tienen movimiento y emplean materia orgánica como fuente de carbono y energía.

Algunos de los hongos más conocidos son: setas, levaduras y mohos.

Los hongos son menos numerosos y crecen a velocidades considerablemente bajas; además, los procesos metabólicos de éstos son menos diversos que el de las bacterias. Como grupo, los hongos tienden a ser más tolerantes a los ácidos que las bacterias (muchas especies crecen a un pH óptimo de 5 o menos) y son más sensibles a la variación en la humedad.

Un hongo que tiene un considerable potencial en el tratamiento de compuestos orgánicos peligrosos es *Phanerochaete chrysosporium*, hongo de la podredumbre blanca. Este organismo produce una enzima extracelular peroxidasa que degrada la lignina en presencia del peróxido; se ha encontrado que degrada una alta variedad de compuestos altamente clorados y recalcitrantes. El uso de dicho hongo está limitado para condiciones en las cuales el nitrógeno esté limitado porque la peroxidasa no se produce de otra manera.

2.2.3 Microorganismos usados para eliminar residuos de hidrocarburos. Los microorganismos aislados en suelos poseen actividades de peroxidasa y oxigenasa, que permiten la oxidación de algunas fracciones del petróleo. Esta oxidación cambia las propiedades de los compuestos haciéndolos susceptibles a ataques secundarios y facilitando su conversión a bióxido de carbono y agua.

2.2.3.1 Rhodococcus. Uno de los géneros bacterianos más explotados en bioprocesos no convencionales es *Rhodococcus*, un grupo único consistente en microorganismos que presentan una gran diversidad metabólica, capaz de transformar, biodegradar y utilizar como única fuente de carbono compuestos hidrófobos.

Poseen una gran variedad de vías metabólicas para la degradación y modificación de compuestos aromáticos, incluyendo las actividades de di-oxigenasa y mono-oxigenasa sobre anillos, así como la actividad de ruptura de catecol. Algunas cepas presentan también la vía del 3-oxoadipato. Lo anterior sumado a su capacidad de crecimiento en medios con escasos nutrientes, la carencia de un sistema de represión catabólica y su persistencia ambiental las hacen excelentes candidatas para los tratamientos de biorremediación. Dentro de las aplicaciones industriales y ambientales, se incluye la producción de ácido acrílico y acrilamida, conversión de esteroides, biorremediación de hidrocarburos clorados y fenoles, a lo que se añade su gran capacidad de degradar hidrocarburos alifáticos halogenados y numerosos compuestos aromáticos, como los HAP's (hidrocarburos policíclicos aromáticos). Nuevas especies de *Rhodococcus* que presentan una nueva mutación tienen la capacidad de degradar compuestos alifáticos con enlaces dobles principalmente en el noveno carbono del grupo metilo terminal (alquenos).

2.2.3.2 Pseudomonas. Las bacterias de este género poseen la habilidad para utilizar diversos substratos, incluyendo aquellos creados por el petróleo. Son bacterias Gram negativas, obicuas, que pertenecen a la subclase gamma de las Proteobacterias.

Son bacterias productoras de biosurfactantes. Algunos microorganismos productores de biosurfactantes extracelulares solubilizan y facilitan la penetración de los hidrocarburos a través de la pared celular hidrofílica; contienen además enzimas degradadoras de hidrocarburos en la membrana citoplasmática. La *Pseudomonas aeruginosa*, es otro de los microorganismos más usado y estudiado en biorremediación. Estudios con relación al desempeño metabólico de esta *Pseudomona* ha permitido identificarla como degradadora de gran cantidad de sustratos como el n-hexadecano, mineralización de compuestos alifáticos en condiciones anaerobias, y degradadora de hidrocarburos aromáticos y poli aromáticos.

2.3 METODOS DE BIORREMEDIACION

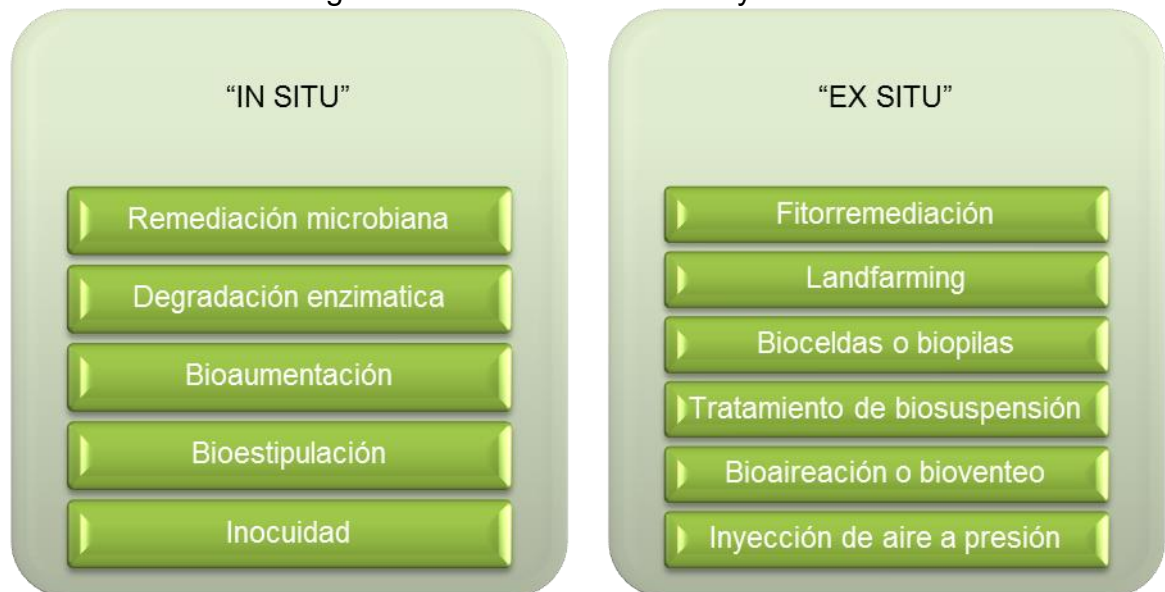
La biorremediación se aplica a cualquier sistema o proceso en el que se empleen métodos biológicos para transformar contaminantes riesgosos para el medio ambiente.

Existen parámetros que aumentan o disminuyen la probabilidad de obtener buenos resultados en el proceso de biorremediación en un medio contaminado por hidrocarburos. La técnica apropiada para llevar a cabo este proceso, debe ser el resultado de la valoración de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante a tratar que se debe evaluar en una etapa previa de planificación.

La biorremediación se puede clasificar: según el lugar de realización, según el microorganismo empleado y según la técnica utilizada.

2.3.1 Según el lugar de realización. La biorrecuperación de estos suelos contaminados puede variar dependiendo la intervención que se haga en los mismos, las cuales pueden ser “in situ, en el lugar”, cuando el tratamiento del suelo se realiza sin excavar, y “ex situ, fuera del lugar” cuando se lleva a cabo la excavación del suelo. En la figura 7 se muestra la clasificación más importante de la biorremediación, mostrando las técnicas que pueden aplicarse a la misma.

Figura 7. Clasificación “in situ” y “ex situ”



Fuente: Elaboración Propia

2.3.1.1 Biorremediación “in situ”. Esta técnica normalmente es la opción más adecuada para el tratamiento de desechos de lodos en base aceite, ya que no es necesaria la preparación y excavación del material contaminado. No obstante, antes de decidir el tipo de tratamiento debe tenerse en cuenta varios factores entre los que se destacan:

- Impacto ambiental en la zona.

- Actividades industriales que pueden verse afectadas.
- Costos comparativos con otros tratamientos.
- La dificultad de acceso a la zona contaminada para proveer de oxígeno y nutrientes.
- La determinación del porcentaje de tratamiento.
- La velocidad del proceso.
- El potencial peligro de extensión de la contaminación

2.3.1.2 Biorremediación “ex situ”. Son los tratamientos que se distinguen cuando el procedimiento se realiza fuera del lugar donde está la contaminación: tratamiento por vía sólida y tratamiento por vía suspensión.

La biorrecuperación vía sólida se puede realizar por dos métodos: tratamiento en lechos y tratamiento por compostaje. La diferencia fundamental entre ambos es el sistema de aireación, mientras que en el primero sólo se pueden tratar las capas de suelo menos profundas, en el compostaje se requiere la formación de grandes apilamientos de material degradable.

En el tratamiento vía suspensión se excava el material contaminado y se traslada a un reactor. La característica de este método es la suspensión en un medio acuoso del área a tratar, es decir, el tratamiento se lleva a cabo bajo condiciones de saturación de agua.

La ventaja de estos procedimientos frente a los primeros radica en la posibilidad de optimizar mejor los parámetros microbiológicos, así como el control del proceso; a cambio, lógicamente, de un mayor costo.

2.3.2 Según el organismo utilizado

2.3.2.1 Remediación microbiana. Es el uso de microorganismos directamente en un área contaminada por hidrocarburos. Estos pueden existir en este sitio o provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser inoculados en el sitio contaminado. Cuando no es necesario la inoculación de los mismos, suelen adicionárseles nutrientes como lo es el nitrógeno, con el fin de acelerar el proceso de degradación.

Hay bacterias y hongos ya antes mencionados que pueden degradar con relativa facilidad el petróleo y sus derivados.

2.3.2.2 Degradación enzimática. Consiste en el empleo de enzimas en el área a tratar con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas se obtienen a partir de bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas.

La descontaminación se logra debido a la capacidad natural de estas enzimas para transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas.

2.3.2.3 Fitorremediación. Es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados y constituye una estrategia muy interesante debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radiactivos, etc.

Inicialmente, el término de fitorremediación se asoció al uso de plantas capaces de bioconcentrar niveles inusuales de metales en sus tejidos. La mayor parte de ellas están constituidas por pequeñas plantas herbáceas que se desarrollan en zonas metalúrgicas naturales o en depósitos.

Hoy en día, las investigaciones en fitorremediación se encaminan no sólo al tratamiento de contaminantes inorgánicos (metales, metaloides, haluros y radionucleidos), sino también al tratamiento de contaminantes orgánicos; algunas especies de plantas probadas con éxito en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo son: *Zea mays* L., *Panicum maximum* Jacq., *Paspalum virgatum* L., *Echinochloa polystachya* H.B.K., *Sorghum vulgare* L., *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus coccineus* L., *Chamaecrista nictitans* (L.) Moench., *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich) Stapf., *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., entre otras. (Revista Latinoamericana de Microbiología vol 48. Abril - Junio de 2006)

- **Fitodescontaminación y fitoestabilización.** Es el proceso por el cual la concentración de contaminantes del suelo se reduce a niveles tolerables a través de la acción de las plantas, su microflora asociada y de las técnicas agronómicas apropiadas. A su vez, los procesos que se muestran en la figura 8.

Figura 8. Procesos de fitodescontaminación y fitoestabilización

Fitoextracción	• Es el proceso por medio del cual las plantas absorben los contaminantes metálicos y orgánicos del suelo, que posteriormente son incorporados a su biomasa.
Rizofiltración	• Es el proceso por medio del cual las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos
Fitoestabilización	• Es el proceso por medio del cual las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje de napas subterráneas o al aire.
Fitoestimulación	• Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos que degradan (bacterias y hongos)
Fitovolatilización	• Proceso por el cual las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración
Fitodegradación	• Es el proceso por medio del cual Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos

Fuente: Elaboración Propia

2.3.3 Según la técnica utilizado

2.3.3.1 Bioaugmentación. Es el proceso en el cual se incrementa la población de bacterias nativas de un ecosistema con la adición de bacterias adaptadas selectivamente, las cuales han sido desarrolladas para aumentar los rangos de reducción orgánica o proporcionar la habilidad de degradar compuestos previamente considerados como difíciles o no biodegradables.

Dicha técnica no sustituye la población de bacterias existentes, pero aumenta su habilidad de responder a ciertas situaciones o degradar compuestos de la corriente de desechos, dando como resultados una mejora al tratamiento.

Esta técnica funciona en condiciones de laboratorio o bioreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores (Alexander, 1999).

- Presencia de toxinas, nutrientes y condiciones ambientales, movilidad y/o distribución de los microorganismos y la presencia de abundante materia orgánica.

- Los microorganismos añadidos deben sobrevivir a los depredadores y competir con éxito con la población autóctona antes de ocupar los nichos potenciales.
- En general, los ambientes más selectivos y la utilización de consorcios microbianos favorecen la bioaumentación.

2.3.3.2 Bioestipulación. En este sistema, el agua subterránea es conducida a la superficie por medio de un sistema de pozos de extracción, se acondiciona en un reactor para volverla a inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo y del acuífero. En el reactor en superficie se agregan al agua: nutrientes, oxígeno, microorganismos previamente seleccionados y adaptados, y el efluente se retorna al subsuelo por medio de pozos de inyección, aspersores superficiales o galerías de infiltración distribuidas a lo largo y ancho del sitio que se requiere remediar. Algunas veces esta técnica utiliza biosurfactantes para ayudar al lavado de contaminantes del suelo (Zitrides, 1990); (Cole, 1994). Las características determinantes en la selección, el éxito o el fracaso de esta técnica de remediación son:

- Tipo de suelo. Los suelos deben ser lo más homogéneos posible, con un valor de porosidad y permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10} \text{ cm}^2$).
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 y 8), de humedad (12-30% en peso), temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.

2.3.3.3 Inoculación. Este método es una forma de tratamiento *in situ*. En este caso los minerales, nutrientes y a menudo los organismos son agregados dentro del suelo a través de los pozos, galerías de infiltración u otras formas, que facilitan que el proceso de degradación se realice en el sitio donde está la contaminación.

2.3.3.4 Tratamiento en lechos o tratamiento vía sólida. También conocido como "Landfarming", esta es la técnica más usada para la biorremediación de los lodos contaminados con hidrocarburos y de otros desechos de la industria petrolera. Esta técnica consiste en excavar los suelos contaminados, extenderlos sobre un área suficientemente amplia y estimular las variables de incidencia en el proceso para promover la actividad de los microorganismos encargados de degradar los hidrocarburos. Antes de extender el suelo contaminado se deben adecuar las condiciones de la superficie para controlar los lixiviados y las aguas lluvias (Zitrides, 1990).

Una vez extendido el suelo contaminado se irriga con las soluciones de nutrientes, los microorganismos y los aditivos químicos en el caso que sean necesarios para la biodegradación. Periódicamente se debe airear el suelo para suministrarle oxígeno, con la ayuda de tractores y retroexcavadoras (aireación mecánica) o sistemas de inyección de aire comprimido. Además, el espesor del suelo extendido debe ser menor de 70 u 80 cm, con el fin de permitir la transferencia de oxígeno del aire atmosférico a la pila del suelo, El sitio donde se realice el tratamiento debe ser adecuado para el manejo de aguas lluvias y control de agua de escorrentía. El suelo extendido debe tener una pendiente para retirar excesos de humedad en la pila. Se deben construir canaletas o diques en tierra o suelo – cemento para evitar la entrada de agua de escorrentía a la zona de tratamiento.

En áreas de riesgo de contaminación de acuíferos, se debe impermeabilizar la zona de tratamiento con sellos de arcilla o geomembranas para evitar el arrastre de hidrocarburos solubles de las lluvias hacia las aguas subterráneas. Para empezar el procedimiento, se hace una búsqueda y selección de bacterias nativas aisladas de las muestras de suelos que se encuentran contaminados, ya que estas tienen la capacidad catabólica para crecer bajo las condiciones físico-químicas y de estrés a las que están sometidas, y tendrán un mejor desempeño a la hora de la biorremediación. La búsqueda comienza en el procesamiento de una muestra de suelo mediante una serie de diluciones, tratando de obtener aquellos morfotipos cultivables; ya que una gran parte de los microorganismos del suelo no pueden ser recuperados en medios para el cultivo de microorganismos. Además de una búsqueda general, se realiza una específica a través de medios selectivos y diferenciales, en la cual se pretende aislar ciertos morfotipos como las *Pseudomona sp.* y bacterias lactosa positivas (bacterias capaces de utilizar la lactosa), debido a su bien conocida actividad degradadora de hidrocarburos.

Luego, estas diluciones son sembradas en diferentes medios de cultivo donde grandes familias de morfotipos se hacen presentes; éstas varían en densidad y diversidad. La diversidad está determinada por los morfotipos recuperados que se diferencian según su morfología macroscópica (su aspecto físico), mientras que la densidad está determinada por el número total de individuos que pertenecen a un grupo con una morfología macroscópica común. Estos datos de densidad y diversidad son de gran valor. Primero, porque indican acerca de la calidad microbiana del suelo, ya que un suelo que tiene gran número de morfotipos, es un suelo que tiene vida y por ende presenta una buena prospección para la biorremediación debido a su posible alta actividad microbiana. Segundo, porque aquellos morfotipos que se encuentren en mayor número serán seleccionados por su habilidad para sobrevivir a la presión selectiva del contaminante y para usarlo como fuente de energía y carbono, pues por eso están creciendo.

Ya seleccionados los morfotipos se conforma un consorcio o pool de microorganismos degradadores de hidrocarburos y, utilizando la estrategia de bioaumentación, se hace una producción a mayor escala y en proporciones

estratégicas de estos. En esta producción debe tenerse en cuenta el volumen de suelo contaminado para biorremediar, la concentración del contaminante y las clases de morfotipos que se aislaron.

Los factores a tener en cuenta en la aplicación del “Landfarming” son:

- La existencia de unas condiciones geológicas y geoquímicas favorables.
- El manejo de un consorcio microbiano sobre la utilización de un solo morfotipo, debido a que los morfotipos al estar en grupo pueden tolerar mejor los cambios físico-químicos en el campo y sus actividades metabólicas pueden interactuar entre sí para la parcial o final biorremediación.
- Conocer las condiciones ambientales en las cuales se desea que los morfotipos trabajen, para así poder optimizar la biorremediación, cambiando los posibles parámetros físicos o químicos que puedan ir en contra de la actividad microbiana en el material a biorremediar o en el ambiente.
- Resaltar la importancia que tiene la selección de microorganismos autóctonos (aislados del lugar para la biorremediación), debido a que estos morfotipos se encuentran mejor adaptados al contaminante; a diferencia de morfotipos foráneos, que aunque con una gran actividad biorremediadora, pueden no funcionar bajo las condiciones ambientales del lugar.

2.3.3.5 Bioceldas o biopilas. En esta técnica se basa en formar celdas o pilas de suelo contaminado y materia orgánica (compost) para realizar la biodegradación de los contaminantes, usando una red de tubos perforados que permiten que los nutrientes, microorganismos y aire se mueva a través del material, mediante el empleo de un compresor. En principio, las biopilas se pueden aplicar a la mayoría de los compuestos orgánicos, siendo más eficaz en los compuestos de carácter más ligero. Entre los factores que influyen en la aplicación de las biopilas se destacan:

- Los hidrocarburos deben ser no halogenados y deben encontrarse en el suelo en concentraciones menores a 50.000 ppm.
- Dada la necesidad de excavación y posterior depósito del suelo contaminado, se requiere una superficie de trabajo relativamente grande cuyas dimensiones dependen del volumen de suelo a tratar.
- Necesidad de una densidad de poblaciones microbianas (>1.000 CFU/gramo de suelo), condiciones de humedad (40 a 85% de capacidad de campo),

temperatura (10 a 45°C), textura (baja proporción de arcillas), pH del suelo adecuadas (6 a 8) y baja presencia de metales pesados (< 2.500 ppm).

- La concentración de nutrientes en el suelo cuyo rango normal de C:N:P sea de 100:10:1.

2.3.3.6 Tratamiento de biosuspensión. También conocido como sistema biorreactor o contacto líquido-sólido. El procedimiento consiste en excavar el suelo contaminado y luego introducirlo en un reactor añadiendo nutrientes, agua, y los cultivos microbianos adecuados para que se lleve a cabo la degradación. Se mezcla bien y se airea la suspensión hasta que las transformaciones de los compuestos seleccionados para su eliminación alcanzan el nivel deseado. A continuación se detienen el mezclado y la aireación, y se deja a los sólidos separarse de los fluidos por sedimentación. El sedimento es retirado y, si la transformación ha tenido éxito, el suelo se devuelve a su lugar de origen, mientras que los líquidos se tratan como aguas residuales.

El suministro de oxígeno puede realizarse mediante aireación difusa, turbina difusora y aireación superficial (Metcalf y Eddy, 1991). La tasa de transferencia de oxígeno necesaria es función de la tasa de degradación de los compuestos orgánicos y de la tasa de crecimiento microbiano. Su determinación no es fácil de hacer, sin embargo, las tasas de transferencia disminuyen al aumentar la concentración de sólidos suspendidos.

El mezclado y el suministro de nutrientes también son fundamentales, ya que por el primero se incrementa el contacto entre los microorganismos y los componentes contaminantes, dando como resultado un incremento de las velocidades de transferencia de masa y de reacción. Los nutrientes normalmente optimizan la biorrecuperación por favorecer el crecimiento de los microorganismos. Por otro lado, el mezclado y la aireación ayudan a romper los flóculos de tierra y a disolver los contaminantes.

2.3.3.7 Bioaireación o bioventeo. Es una variante de la técnica de extracción de gas con vapor ("Soil Gas Extraction" o "Volatilización"), que consiste en suministrar aire al terreno contaminado para promover la actividad de los microorganismos presentes en el subsuelo y biodegradar los hidrocarburos. El aire se suministra mediante un sistema de extracción e inyección.

Para diseñar estos sistemas es necesario conocer la permeabilidad del suelo a los gases, con el fin de determinar el radio de influencia de los pozos de venteo, la distancia entre pozos y las dimensiones de los equipos de inyección. La bioaireación generalmente se lleva a cabo en áreas poco profundas y pequeñas; a

menudo es factible la instalación de barreras para guiar el flujo, el uso de cubiertas, un control intensivo, un plan de muestreo y un sistema de ventilación.

Una característica determinante en la selección de esta técnica es el tipo de contaminante, puesto que es de mayor efectividad donde los contaminantes tienen baja volatilidad. Además se deben tener en cuenta las características físicas del suelo, la profundidad de la zona contaminada y el potencial para transportar contaminantes fuera de la zona.

2.3.3.8 Inyección de aire a presión. Consiste en inyectar aire a presión en la parte inferior para desenlazar el agua de los espacios intersticiales de la matriz del suelo. Esta inyección genera principalmente dos efectos:

1. El aire inyectado absorbe gran cantidad de los hidrocarburos volátiles presentes en el agua y el suelo.
2. El aire eleva los niveles de oxígeno del agua mejorando la biodegradación de los contaminantes (Matthews, 1993).

Con la inyección de aire a presión se llevan a cabo dos mecanismos de remoción del contaminante, la volatilización de compuestos de la zona insaturada y la fase acuosa y la biodegradación. El mecanismo gobernante depende de las características de los contaminantes. Las características determinantes en la selección de esta técnica son:

- El tipo de contaminante. Se degradan fácilmente las moléculas más pequeñas (hasta C_{20}), siendo más biodegradables los compuestos parafinados o de cadena lineal que los compuestos aromáticos. En general, son favorables los compuestos de alta volatilidad (presión de vapor mayor de 10 mm de Hg a $20^{\circ}C$).
- Tipo de suelo. Los suelos deben contener bajos contenidos en arcilla y ser lo más homogéneamente posible, con un valor de permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10} \text{ cm}^2$).
- Los aportes de oxígeno deben ser suficientes, así como la existencia de fuentes de carbono, aceptores de electrones y energía suficientes.
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 a 8), de humedad (12 a 30% en peso), potencial redox mayor de -50 mV, temperatura entre 0 y $40^{\circ}C$ y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.

2.4 PAUTAS A TENER EN CUENTA EN EL PROCESO DE BIORREMEDIACIÓN

Figura 9. Pautas a tener en cuenta en la biorremediación



Fuente: Elaboración Propia

2.4.1 Investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento. Lo primero que se debe tener en cuenta en el diseño de un proceso de biotratamiento de un área contaminada con hidrocarburos, es un estudio de la caracterización del emplazamiento, tipo y concentración del contaminante a tratar, para ello se debe detallar el volumen del suelo, características, propiedades (pH, granulometría, humedad, porosidad, entre otras) y condiciones geológicas e hidrogeológicas del mismo.

La caracterización del contaminante debe centrarse como ya se dijo anteriormente en el tipo y concentración de este, pero adicional a ello en la biodisponibilidad de los compuestos en el suelo (aceptores de electrones, metales pesados, nutrientes, etc).

2.4.2 Análisis y elección de las medidas biocorrectivas. Una vez identificadas las características del emplazamiento, del suelo y del contaminante, se podrá pasar al análisis y elección de las medidas biocorrectivas más adecuadas. Para lo cual es necesario:

- a. Identificar y cuantificar los contaminantes, teniendo en cuenta sus propiedades fisicoquímicas más importantes, para lo cual se debe tener en cuenta:
 - Identificación y clasificación de compuestos.
 - Concentración en suelos y aguas subterráneas.
 - Caracterización de la presión de vapor, constante de Henry, densidad y grado de solubilidad.
- b. Conocer los factores que influyen en la transformación biológica de los contaminantes:
 - Factores ambientales tales como humedad, oxígeno disuelto, temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes.
 - Factores microbiológicos tales como presencia de microorganismos y aclimatación de las poblaciones microbianas.
- c. Designar las medidas biocorrectivas. En función de los factores anteriormente expuestos, se elegiría el sistema de biotratamiento más adecuado.

2.4.3 Diseño y evaluación del sistema. En el diseño de un sistema de biorrecuperación se hace necesario establecer unas etapas en las cuales se determina y evalúan los parámetros fundamentales necesarios para su eficacia; estas etapas a seguir son:

- a. Evaluación de la viabilidad de la técnica. En esta se deben estudiar los parámetros de evaluación que definen el sistema elegido, así como se deben evaluar las condiciones de biotratabilidad, los objetivos de limpieza exigidos y los costes de tratamiento necesarios.
- b. Evaluación del diseño. En esta se deben estudiar los factores que afectan la eficacia de la técnica y las posibles mejoras o acondicionamientos a aplicar.
- c. Evaluación del control y seguimiento. Para asegurar la correcta ejecución y un progreso adecuado del tratamiento se debe llevar a cabo un plan de control y

seguimiento del sistema. Para una correcta optimización se deberán controlar los siguientes puntos:

- Control de las condiciones de degradación y biodegradación. Se debe registrar la variación de concentración de TPH, BTEX, CO₂ desprendido y oxígeno disuelto, variación de nutrientes (N, P, etc).
- Control de los parámetros que afectan directamente en el funcionamiento del sistema.

2.4.4 Control y seguimiento. Para asegurar la correcta ejecución y un progreso adecuado del tratamiento se debe llevar a cabo un plan de control y seguimiento del sistema.

Para una correcta optimización se deberán controlar los siguientes puntos:

- a. Control de las condiciones de degradación y biodegradación. Se registrará la variación de concentración de TPH, BTEX, COV's, CO₂ desprendido y oxígeno disuelto, variación de nutrientes (N, P, etc)
- b. Control de los parámetros que afectan directamente en el funcionamiento del sistema

2.4.5 Análisis e interpretación de resultados. En esta última etapa se deben analizar los resultados obtenidos, haciendo un balance de los objetivos alcanzados y los marcados inicialmente. En este punto, si fuese necesario, se deben proponer y estudiar aquellas mejoras o modificaciones necesarias para la optimización del sistema.

3. ANÁLISIS PARA COLOMBIA

En Colombia no se encuentra de forma específica en ninguna Ley o Decreto de orden nacional la legislación sobre contaminación del suelo; pero si se tienen normas de ámbito regional o local (Resoluciones por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales), esto se debe a que el suelo hace parte del ecosistema terrestre entonces no hace énfasis solo a la contaminación del suelo, si no que se generaliza en el preservación de los recursos naturales.

En la Constitución Nacional de 1991 se presentan 17 artículos relacionados con la protección, conservación, control y mejoramiento de los recursos naturales. Sobre el suelo específico se menciona en los artículos 360, 361 y 366, a los cuales se refiere la corte constitucional.

El código penal sanciona los delitos en contra de los recursos naturales en los artículos 242 al 247. Específicamente el artículo 247 se refiere a la sanción que se aplica a quien por contaminación ambiental ilícitamente, incurrirá, sin perjuicio de las sanciones administrativas a que hubiere lugar y siempre que el hecho no constituya otro delito, en prisión de uno a seis años y multa de cincuenta mil a dos millones de pesos.

En la ley 23 de 1997 se relacionan aspectos como la prevención y control de la contaminación del medio ambiente, mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, determinando como vienen contaminables el aire, el agua y el suelo.

En la ley 23 de 1973 se define contaminación como “la alteración del 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”. También define contaminante como todo elemento, combinación de elementos o forma de energía que actual o potencialmente pueda producir alguna o algunas de las alteraciones ambientales descritas en la definición de contaminación.

En el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto 2811 de 1974), en sus artículos relacionados con el medio ambiente, específicamente con el recurso suelo, se tienen los siguientes artículos:

- Artículo 8º. Se consideran factores que deterioran el ambiente, entre otros: La degradación, la erosión, el revenimiento de suelos y las alteraciones nocivas de la topografía.

- Artículos 182º al 186º. Relacionado con el uso y conservación de los suelos.
- Artículos 324º al 326º. Relacionados con los distritos de conservación de suelos.

En cuanto a prevención y reparación en materia petrolera, es necesario centrarse en el Sistema de Prevención y Atención de desastres, pero especialmente en el *“Plan nacional de contingencia contra derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas en aguas marinas, fluviales y lacustres”* adoptado por el Gobierno Nacional mediante el decreto 321 de 1999, que constituye el instrumento rector del diseño y realización de actividades dirigidas a prevenir, mitigar y corregir los daños ocasionados por derrames de hidrocarburos, buscando una única línea de acción. El decreto 321 es un esfuerzo de coordinación institucional que busca atender este tipo de emergencia a través de tanto en el sector público como privado, bajo criterios unificados.

En cuanto a reglamentación se encuentran diversos cuerpos normativos, como es el caso del decreto 1895 y 1973 en el artículo 95, por el cual se dictan normas de explotación y exploración petrolera⁴. El decreto 1945 y 1984 fija los estándares y las normas a los se deben someter los vertimientos, normalmente asociados a la producción.

En el Art. 2º de la ley 491 de 1999 se dice que en Colombia el seguro ecológico tendrá por objeto *“amparar los perjuicios económicos cuantificables producidos a una persona determinada como parte de la consecuencia de daños al ambiente y a los recursos naturales, en los casos de responsabilidad civil excontractual, cuando tales daños hayan sido causados por un hecho imputable al asegurado siempre y cuando no sea producido por un acto meramente potestativo o causado con dolo o culpa grave; o en los casos de los seguros reales como consecuencia de un hecho accidental, súbito e imprevisto de la acción de un tercero o por causas naturales.”*

En la ley 491/99 Art.6 en el cual se determina que la respectiva autoridad ambiental previa solicitud del interesado podrá certificar sobre la ocurrencia de un daño ambiental. En los eventos en que el valor amparado no cubra la cuantía del daño, quien fuere el causante del hecho deberá responder con su propio patrimonio por todos los daños o perjuicios causados en exceso (Art.8 L491/99).

⁴ *“Los operadores responsables de cualquier tipo de contaminación, removerán a su costa de la zona afectada cualquier material contaminante. El Ministerio podrá suspender de plano las operaciones de perforación, producción, transporte o almacenamiento, cuando se compruebe que se han violado las normas consagradas en este capítulo.”*

Teniendo en cuenta la normatividad ya expuesta y la preservación de los recursos naturales de Colombia, la industria petrolera puede realizar la recuperación de los lodos en base aceite por medio de la técnica RECLAIM la cual puede ser una muy buena alternativa en proyectos de perforación activos (pozos productores), para mejorar la eficiencia del equipo de control de sólidos, en el reacondicionamiento de lodos y en la recuperación de los mismos en los cortes de perforación para posterior a ello ser mezclados con los lodos de perforación para ser reutilizados. La reinyección de cortes de perforación puede ser una técnica menos costosa en comparación con la técnica RECLAIM, con esto se busca dar un tratamiento a los residuos de los cortes de perforación que quedan luego de que se someten a la zaranda vibratoria los mismos, con esto se busca que estos sean reinyectados en el subsuelo siendo una buena alternativa en pozos exploratorios.

Por otro lado los desechos que quedan luego de hacer una recuperación o reinyección de cortes de perforación o residuos de cortes de perforación que no han recibido ningún tratamiento se les puede aplicar la biorremediación siendo una muy buena opción en lugares donde las condiciones del suelo sean aptas y se tenga espacio suficiente para realizarlo. Para ello se puede tener en cuenta la tabla 1, en la cual se muestran los tipos de suelos, las condiciones ambientales de las diferentes regiones de Colombia y los tipos de biorremediación que pueden aplicarse bajo estas condiciones.

Es importante aclarar que aunque aquí se muestre el tipo de tratamiento de biorremediación que puede aplicarse en las diferentes regiones de Colombia, antes de ponerlo en práctica, se debe hacer una planeación, un estudio previo y un diseño de la metodología a utilizar como se mostró en el numeral 2.4

En los suelos Colombianos existe un número reducido de microorganismos con capacidad de biodregadar hidrocarburos. Las moléculas orgánicas que constituyen el material vegetal y animal como cortes de perforación, se adicionan al suelo para realizar ciclos biogeoquímicos de degradación, liberando compuestos orgánicos con estructuras y propiedades iguales o similares a las que se producen en la biodegradación de hidrocarburos.

Tabla 1. Tipos de suelos y condiciones ambientales de las regiones Colombianas

Región	Orinoquía	Amazonia	Pacífico	Caribe	Andina
T (°C)	• 24 – 28 con excepción del piedemonte: 8 - 20	- 24 – 28 con excepción del piedemonte: 12 – 20	- Partes bajas de los departamentos de Chocó y Valle: 24- 28 - Litorales de Nariño y Cauca: 20 – 24	-Alta y media Guajira: 28 - 32 -Cesar, Bolívar, Magdalena, Atlántico y Sucre: 24 - 28	- En las áreas de los ríos Magdalena, Cauca, Patía y Sogamoso: 24- 28 -Altiplanos Cundinamarca, Boyacá, Nariño, la zona montañosa del centro de Antioquia, Cauca y el Viejo Caldas: 12 - 16 - Paramos y nevados: <4
pH	< 5	5.5 - 3.7	4.5 - 5.5	> 5.6	Básico cercano a la neutro
Humedad relativa	>75%	84 - 88%	88.3%	80%	65% aprox
Suelos más predominantes	Oxisoles	Oxisoles - Ultisoles	Inceptisoles-Entisoles	Alfisolos - Molisoles Entisoles -Inceptisoles (62%)	Andisoles
Suelos menos predominantes	Ultisoles	Entisoles - Inceptisoles	Andisoles(montañas), Vertisoles - Ultisoles, Oxisoles - Histosoles	Oxisoles - Ultisoles	Molisoles -Alfisolos Oxisoles- Ultisoles
Tipo de biorremediación que se puede aplicar	Hidrolavado + Bioveting o Biopilas o Bioaumentacion (in-situ)	Hidrolavado + Bioveting o Biopilas o Bioaumentacion (in-situ) Adición de producto remediador (in-situ)	Land Farming+ Bioaumentación + Fitorremediación	Land Farming + Bioestimulacion Hidrolavado + Bioveting o Biopilas o Bioaumentacion (in-situ) Adición de producto remediador (in-situ)	Bioelectrocinética

Fuente: Elaboración Propia basado en "Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos"

A continuación se explicaran los tipos de biorremediación que pueden aplicarse bajo estas condiciones.

3.1 BIORREMEDIACIÓN DE ALFISOLES Y MOLISOLES

Estos son los tipos de suelos con mayor fertilidad natural. Una buena alternativa es la Bioestimulación alternativa ya que en ella es indispensable el acondicionamiento o ajuste de los principales factores abióticos, tales como pH, humedad, aireación y nutrientes, entre otros que favorecen o estimulan el desarrollo de poblaciones bacterianas. Son muchos los estudios conducidos tanto a escala laboratorio como en campo que demuestran la efectividad del proceso de biodegradación bajo la modalidad de bioestimulación, sin necesidad de añadir preparaciones biológicas, o usar la bioaumentación. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en este tipo de suelos y se han demostrado sus bondades en comparación con la bioaumentación en diversos desechos de la industria petrolera, tales como cortes de perforación, suelos contaminados por derrames de productos y crudo, lodos de fondo de tanques y saneamiento de fosas. Su aplicación ha sido realizada como Landfarming, referida a la biodegradación del contaminante en la capa arable del suelo; compostaje aeróbico, formando pilas de hasta 3 m de altura y 2 m de ancho con incorporación de mejoradores orgánicos y tratamiento “in situ”, como en el caso de fosas, en las cuales se aplica el biotratamiento o biorremediación dentro de la misma, sin necesidad de remover y extraer el desecho para tratarlo en otra área.

3.2 BIORREMEDIACIÓN DE ANDISOLES

La técnica que se puede aplicar en este tipo de suelo, es llamada bioelectrocínética. Se combina la aplicación de la corriente eléctrica directa con alguna de las técnicas de biorremediación. Se busca estimular la biodegradación de contaminantes orgánicos al introducir nutrientes y bacterias dentro del suelo.

3.3 BIORREMEDIACIÓN DE ARIDISOLES Y ENTISOLES

El tratamiento en este tipo de suelos consiste en la aplicación de procesos de Landfarming in situ, en un trabajo artesanal y manual, efectuando una bioaumentación con bacterias autóctonas, con el objeto de acelerar el proceso de degradación del contaminante. De esa manera se aumentan las posibilidades de mantener las características bióticas de la tierra, y se reducen los tiempos para la resolución del problema. Durante los primeros días se realizan las siguientes actividades:

- Extracción de muestras para determinar la calidad del hidrocarburo y la concentración presente del mismo.

- Se retiran las tierras afectadas, impregnadas, tratando las mismas en la cancha de Landfarming asentada en un lugar cercano.
- Se agrega material granular para asegurar que la porosidad se mantenga, para así crear cámaras de oxígeno indispensables para el metabolismo de las bacterias (aeróbicas).
- Se controla la humedad hasta obtener la humedad ideal, y se siembran bacterias hidrocarburofíticas y nutrientes en el suelo afectado.
- Para mantener el proceso degradativo, se remueve el suelo periódicamente y se controla la humedad del mismo.

3.4 BIOREMEDIACIÓN DE INCEPTISOLES

Estos suelos incluyen de regiones húmedas, que no han alcanzado a desarrollar caracteres diagnósticos de otros órdenes, pero muestran evidencias de desarrollo progresivo. Son suelos inmaduros, con escasa expresión morfológica. Los parámetros edáficos que determinan y condicionan la elección de un suelo para "landfarming" son: textura, estructura, pH, temperatura, porosidad, velocidad de percolación, capacidad de retención de agua, infiltración, contenido de oxígeno, contenido de macro y micronutrientes, humedad.

La textura del suelo incide en la aireación, en su capacidad de retención de agua, porosidad y velocidades de percolación e infiltración. Los suelos de dicho orden, pueden ser predominantemente limo-arcillosos en superficie y netamente arcillosos en profundidad, poseen buen drenaje. La temperatura del suelo, recomendada para la biodegradación del petróleo se encuentra entre 20 y 30 °C; si se utiliza la población microbiana autóctona del suelo se puede lograr que los microorganismos involucrados posean estrategias adaptativas de sobrevivencia para soportar la variabilidad climática de su hábitat natural. La estructura, textura y materia orgánica del suelo son factores determinantes de la porosidad del mismo, entonces estos parámetros deber ser determinados antes, durante y luego de finalizado el biotratamiento. Otros nutrientes como zinc, calcio, hierro, molibdeno, azufre, etc., llamados micronutrientes, por sus pequeñas concentraciones, también deben controlarse y suministrarse en caso necesario. El laboreo agrícola debe iniciarse previo a la incorporación del residuo, con el objeto de descompactar, airear y homogeneizar el material de las capas superficiales, de modo que pueda aumentarse mecánicamente el número de poros.

Para este tipo de suelos se hace posible utilizar uno o varios métodos a la vez para recuperar la actividad microbiológica del suelo, pues es necesario que en las temporadas secas donde se evidencia la compactación del terreno, se haga riego del terreno y en las temporadas de lluvias se realicen calicatas exploratorias y laboreo agrícola con herramientas convencionales. Las celdas Landfarming, la bioaumentación y la fitorremediación son métodos que se pueden utilizar en este tipo de casos, en algunos, se hace necesaria la utilización de los tres métodos, lo que depende del daño (antecedentes del suelo), de las características climáticas de la zona y de la actividad microbiológica del suelo, estudiada con anterioridad

3.5 BIORREMEDIACIÓN DE ULTISOLES

En estos suelos se ha evaluado la efectividad de varios productos comerciales formulados para la biorremediación de ultisoles en sitios contaminados con hidrocarburos. Se han realizado distintas pruebas combinando dichos productos comerciales y un fertilizante agrícola en una vegetación pantanosa contaminada con petróleo crudo a una concentración de aproximadamente 30%, encontrando que entre los diferentes tratamientos el mejor fue el fertilizante agrícola, pero también el producto surfactante ligero con nutrientes funcionó relativamente bien.

El remediador aplicado consiste en una formulación a base de biomásas vegetales que combina diferentes partes aéreas de plantas en proporciones específicas que suministran nutrientes, particularmente nitrógeno, a los procesos de biorremediación. Además del contenido de nitrógeno y otros nutrientes, las biomásas vegetales actúan mejorando la estructuración del desecho al incrementar la porosidad en el desecho y por ello el intercambio de oxígeno. Todas estas características favorecen el proceso de biodegradación de los componentes saturados y aromáticos de un crudo, cuya dosis de aplicación del producto varía en función de la concentración del crudo en el desecho. Este producto ha sido aplicado exitosamente en áreas sensibles como los ultisoles, para el manejo de cortes base aceite.

Además de la biodegradación de los componentes saturados y aromáticos, los productos remediadores actúan como un mejorador orgánico, restaurando el equilibrio ecológico del suelo al favorecer el desarrollo de la cobertura vegetal. Una vez aplicado, el producto se mezcla por medio de maquinarias en los primeros horizontes del suelo, ajustando el porcentaje de humedad del suelo a un 60 % de la capacidad de campo.

3.6 BIORREMEDIACIÓN DE OXISOLES

En este tipo de suelos las alternativas de biorremediación son variadas. La metodología que se puede aplicar para limpiar las zonas pantanosas e inundables (características de este tipo de suelos) para la descontaminación del suelo contaminado con cortes de perforación debe realizarse en dos fases:

Fase 1

- Lavado de sedimentos y suelos contaminados con hidrocarburos. Para este lavado se aplica biodesengrasantes a alta presión con ayuda de pitones de vástago y compresores. Con el fin de remover los sedimentos y permitir que el hidrocarburo se libere de las arcillas, limos y arenas presentes en el pantano. De igual forma, el hidrocarburo liberado se colecta en las trampas establecidas al final de cada muro de contención. Este proceso de lavado se aplica tantas veces como sea necesario a fin de remover la mayor cantidad de hidrocarburos.
- Debido a condiciones climáticas de las zonas húmedas donde hay oxisoles, se evalúa la necesidad de encausar las aguas provenientes de los pantanos que pueden estar ubicados aguas arriba, de tal forma que el área de trabajo no esté totalmente inundada.

Fase 2

Las siguientes son las actividades que se realizan para el tratamiento del material vegetal contaminado con hidrocarburo, material confinado y almacenado en sacos de polipropileno:

- El lavado del suelo es una técnica que consiste en el uso de agentes desengrasantes orgánicos a base de cítricos (Orange Truch), generalmente agua, acompañada de un procedimiento mecánico vibratorio que permite clasificar y separar el crudo de los sedimentos con el fin de depurar el suelo.
- El elemento mecánico está conformado por zarandas vibratorias montadas sobre un tanque abierto que permite capturar el hidrocarburo recuperado; al momento de pasar el material o sedimentos por la malla este es sometido a una presión de agua combinada con agente desengrasante que remueve el hidrocarburo del sedimento.
- En el procedimiento de lavado del suelo se separa la tierra fina (limo y arcilla), de la tierra gruesa (arena y grava). - Las partículas de grava y de arena más pesadas se asientan y son sometidas a pruebas para detectar contaminantes. Si están limpias, este material se puede usar en el sitio o llevarse a otro lugar

para usarlo como relleno. Si aún quedan vestigios de contaminantes, se puede someter el material a otro ciclo de lavado, recogerlo para aplicarle un tratamiento diferente o disponerlo en otro lugar. - El limo y la arcilla contaminados que están en el agua del lavado se asientan y se separan del agua del lavado; luego, se los somete a una prueba para determinar si contienen contaminantes. Si están limpios, este material se puede usar en el sitio o llevarse a otro lugar para usarlo como relleno. Si por el contrario, el material todavía presenta trazas de hidrocarburos, se dispone en forma de biopilas para someterlo a un proceso de degradación mediante la aplicación de nutrientes y bioventilación para que el material en contacto con el oxígeno de los hidrocarburos residuales.

- El agua del lavado es sometida a tratamiento, previo vertimiento o reutilización.

Bioventing: Técnica de tratamiento de biorrecuperación de tipo “in situ”, consistente en la ventilación forzada del suelo mediante la inyección a presión de oxígeno (aire) en la zona no saturada del suelo a través de pozos de inyección. Debido a la aireación del suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes, y por biodegradación, ya que al incrementar la oxigenación del suelo se va a estimular la actividad bacteriana.

Biopila: También conocidos como bioceldas. Son usadas para reducir las concentraciones de los constituyentes del petróleo en suelos excavados mediante la biodegradación. Esta tecnología involucra el apilamiento del suelo en celdas y la estimulación de la actividad aeróbica de los microorganismos dentro del suelo a través de la aireación y o adición de minerales, nutrientes y humedad. Las biopilas son similares al landfarming, los dos métodos son en la superficie del terreno, pero en las biopilas se utilizan sistemas de ingeniería que usan oxígeno, generalmente aire, para estimular el crecimiento y reproducción de las bacterias aeróbicas, las cuales degradan los constituyentes del petróleo absorbidos en el suelo. Mientras que los landfarmig son aireados por labrado o arado, las biopilas son aireadas más a menudo forzando aire a moverse por inyección o extracción a través de ranuras o tuberías perforadas en toda la pila. El proceso de biodegradación empieza con la mezcla de los residuos aceitosos o suelos contaminados con la tierra del sector dispuesto para el tratamiento, previa caracterización físico-química y microbiológica del suelo, y posterior adición de nutrientes fundamentales para la estimulación del crecimiento bacteriano nativo, como el Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

4. CONCLUSIONES

La contaminación de suelos que se produce por los residuos de hidrocarburos generados en la perforación pozos, específicamente por lodos en base aceite; puede disminuir por medio de mecanismos de reutilización de estos lodos, utilizando la tecnología reclaim y la disposición final de los mismos mediante la reinyección de cortes de perforación. Ahorrando no solo costos en procesar desechos de esta actividad, si no también contribuyendo a disminuir el impacto ambiental.

La biorremediación sin duda alguna es una muy buena alternativa para el tratamiento de los residuos generados por los lodos en base aceite. La velocidad de descomposición de estos residuos por los organismos dependerá en gran parte a la concentración de los mismos y de factores medio ambientales tales como temperatura y pH.

Aunque el principio del tratamiento de biorremediación, sea el mismo, en la degradación de desechos de hidrocarburos, existen gran variedad de metodologías que se pueden aplicar dependiendo las características del residuo a tratar y las condiciones ambientales donde se vaya a realizar este proceso.

En el proceso de la biorremediación, lo más importante es incentivar la población autóctona para realizar el proceso de biodegradación, tomando como primera alternativa las técnicas "in situ" ya que son menos costosas y generan menos impacto sobre el suelo al no requerir excavación.

Cada compañía puede escoger el mecanismo de reutilización o disposición final que más se adapte a sus necesidades y que pueda contribuir para obtener desechos que generen menos impacto al medio ambiente. Mediante estudios previos con planeación y diseño de la alternativa de biorremediación más favorable teniendo en cuenta las pautas para el desarrollo de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

ADAMS SCHROEDER, Randy H. DOMÍNGUEZ RODRÍGUEZ, Verónica I. GARCÍA HERNÁNDEZ, Leonardo. Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Publicado por Terra Latinoamericana, México 1999.

ATLAS, R.M. and UNTERMAN, R. Bioremediation. In: ATLAS, R.M. and UNTERMMAN, R. eds. Industrial microbiology and biotechnology. 8 ed. Washington. American Society for Microbiology (ASM) Press. 1999.

BRAVO, Elizabeth. Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad, Madrid 2007

CÁRDENAS, Araújo. BOHÓRQUEZ, Marianela. Gómez, K Karinés. Angulo, Nancy. Gómez, Angel. "Influencia de la fertilización en la Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando lodos residuales estabilizados".[En línea]

DIAZ CONSUEGRA, Harving. "Revisión de los procesos de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, aplicados en Colombia" Tesis de grado Ingeniero de petróleos. Bogotá.: Universidad Nacional de Colombia. Faculta de Ingeniería. 1999

GLAZER, A.N. y NIKAIDO, H. Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology. W. H. Freeman and Company, New York 1995.

<<http://www.ingenieroambiental.com/4014/angulo.pdf>> [citado 23 de junio de 2012]

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Trabajos escritos: presentación y referencias bibliográficas. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructra. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008.

MAINI G. y SHARMAN A.K. (1999). Enhanced removal of copper from contaminated silt soil using bioelectrokinesis. En: Bioremediation of metals and inorganic compounds. (A. Leeson y B.C. Alleman, Eds.). Battelle press, EUA, Columbus

MALAGÓN, Dimas. Ensayo sobre tipología de suelos Colombianos -énfasis en génesis y aspectos ambientales. Publicado por Universidad Nacional de Colombia, 2003.

MARKS R.E., ACAR Y.B. y GALE R.J. (1994). In situ remediation of contaminated soils containing hazardous mixed wastes by bio–electrokinetic remediation and other competitive technologies. En: Remediation of hazardous waste contaminated soil. (D.L Wise y D. Trantolo, Eds.) Marcel Dekker, Nueva York

MAROTO ARROYO, M^a Esther y ROGEL QUESADA, Juan Manuel. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos

MARTÍNEZ PRADO, Adriana. PÉREZ LÓPEZ Ma. Elena, PINTO ESPINOZA Joaquín. GURROLA NEVÁREZ Blanca Amelia. y OSORIO–RODRÍGUEZ, Ana Lilia. " Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes". [En línea] < <http://www.scielo.org.mx>> [citado 29 de junio de 2012]

OLGUIN, Eugenia J. HERNANDEZ, María Elizabeth. SANCHEZ-GALVAN, Gloria. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. Publicado por Revista. Internacional de Contaminación Ambiental, México 2007.

TORRES, Katherine. ZULUAGA, Tatiana. "Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos" Tesis de grado Ingeniería Química. Medellín.: Universidad Nacional de Colombia. Faculta de Minas. 2009.

VÁSQUEZ, María Cristina. GUERRERO, Jennifer. QUINTERO, Andrea del Pilar. "Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados". ". [En línea] < <http://www.scielo.org.co>> [citado 12 de julio de 2012]

VIANA, Javier. Tratamiento y eliminación de desperdicios de perforación de exploración y producción. Publicado por ARPEL, Uruguay.

VIÑAS, Marc. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. Trabajo de Grado Doctor en Biología. Barcelona. Universidad de Barcelona. Facultad de Biología. 2005.