



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE LANDFARMING PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Paul Castillo-Rojas

Piura, marzo de 2009

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Castillo, P. (2009). *Aplicación de la técnica de landfarming para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos* (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERIA



“Aplicación de la técnica de *landfarming* para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos”

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Paul Alfonso Castillo Rojas

Ing. Ana María Chávez de Allain

Piura, Marzo 2009

A mis padres y hermanos por creer en este proyecto y en especial a mi esposa e hijas por el apoyo para conseguir el objetivo.

PRÓLOGO

El motivo principal que conllevó a investigar la efectividad de la técnica de *landfarming* en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo en nuestra región, exactamente, en la ciudad de Talara, fue la recopilación de las buenas prácticas en la aplicación de la técnica en un proyecto real en la región, ya que la mayor información sobre el tema se encuentra en artículos técnicos que siempre enfocan el tema en los resultados obtenidos en algún proyecto real, pero siempre ejecutado fuera de nuestro país.

Estas buenas prácticas servirán para la aplicación futura de proyectos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo en la región, y ayudarán a concientizar a las compañías ejecutoras, en cualquier operación industrial, que mejor es prevenir antes que contaminar.

Cabe recalcar que contamos con la autorización del Cliente para la utilización de la información del proyecto real expuesto en el capítulo 3 de la presente tesis, sin embargo evitaremos utilizar su nombre explícitamente.

Aprovecho el mismo para agradecer a la Universidad de Piura por la educación sólida brindada y en especial a Ing. Ana María Chávez por el buen asesoramiento en el presente trabajo de tesis y por la paciencia en la espera de terminación.

RESUMEN

El desarrollo de la industria petrolera ha contribuido a un marcado deterioro ambiental, afectando el agua, el suelo y el aire. Dentro de esta industria, las actividades de refinación alteran los ecosistemas como consecuencia de derrames de crudo y/o productos refinados o por el uso de aditivos u otros productos químicos, haciéndose necesario buscar alternativas que permitan remediar y/o restaurar los suelos contaminados.

El presente proyecto de tesis, desarrollado en el área estanca de un tanque de almacenamiento de diesel, considera como caso práctico la aplicación combinada de *landfarming* y biodegradación como proceso de remediación tendiente a reducir la concentración de hidrocarburos en suelos contaminados, hasta niveles por debajo del 2% (TPH). Este nivel de remediación fue establecido en respuesta a la carencia de una normativa ambiental que determine las pautas y exigencias de saneamiento para suelos contaminados con hidrocarburos.

Los resultados obtenidos sugieren que la metodología utilizada representa una alternativa ambiental y económicamente viable en la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos, la cual se ve favorecida cuando es aplicada a suelos arenosos y cuando el hidrocarburo es de cadena corta.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	
1.1 El suelo	3
1.1.1 Definición	4
1.1.2 Edafogénesis	4
1.1.2.1 Roca madre	4
1.1.2.2 El clima	4
1.1.2.3 Relieve	5
1.1.2.4 Organismos	5
1.1.2.5 El tiempo	5
1.1.3 Clasificación de los suelos	6
1.1.3.1 Clasificación según tamaño de partículas	7
1.1.3.2 Clasificación por capacidad de uso mayor del suelo	8
1.1.4 Estructura y perfil del suelo	9
1.1.5 Composición del suelo	10
1.1.5.1 Constituyentes sólidos	11
1.1.5.2 Contenido de agua	12
1.1.5.3 Componentes gaseosos	12
1.1.5.4 Biología del suelo	13
1.2 El petróleo	15
1.2.1 El petróleo y sus características	15
1.2.2 Historia de la explotación petrolera en el Perú	17
1.2.3 Distribución geográfica	19
1.2.4 Reservas petroleras y gas natural	20
1.2.5 Exploración	22
1.2.6 Explotación	24
1.2.7 Refinación y transporte	27
1.3 Contaminación de suelos por hidrocarburos de petróleo	28
1.3.1 Concepto de contaminación	28
1.3.2 Efecto contaminante de la industria petrolera en el suelo	29
1.3.3 Comportamiento de los hidrocarburos en el suelo	31
1.4 Legislación aplicada vigente	33
1.4.1 Legislación internacional	33
1.4.2 Legislación nacional general	35
1.4.3 Legislación nacional subsector hidrocarburos	39
CAPÍTULO 2: REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS	
2.1 Concepto de remediación	43
2.2 Tipos de remediación	44
2.2.1 Biorremediación	44
2.2.2 Extracción	46
2.2.3 Fijación	46
2.2.4 Incineración	46
2.2.5 Desorción térmica	47
2.2.6 Filtración	47
2.2.7 Confinamiento	47

2.3 Variables a monitorear	47
2.3.1 Tipo y concentración de contaminante	48
2.3.1.1 Tipo de hidrocarburo	48
2.3.1.2 Concentración de hidrocarburo	48
2.3.1.3 Antigüedad de la contaminación	48
2.3.2 Presencia de microorganismos	49
2.3.2.1 Inoculación	50
2.3.2.2 Bioaumentación	50
2.3.3 Nutrientes	50
2.3.4 Aireación	51
2.3.5 Condiciones ambientales	51
2.3.5.1 pH	51
2.3.5.2 Humedad	51
2.3.5.3 Temperatura	52
2.3.5.4 Presencia de metales pesados y sales	52
2.3.5.5 Biodisponibilidad	52
2.3.6 Indicadores de Calidad Ambiental	52
2.3.6.1 Estándar de Calidad Ambiental- ECA	53
2.3.6.2 Límite Máximo Permisible- LMP	53
2.3.6.3 Estándar de Calidad Ambiental del suelo	54

CAPÍTULO 3: CASO PRÁCTICO

3.1 Descripción del área de estudio	55
3.1.1 Antecedentes	55
3.1.2 Resumen del proyecto	56
3.2 Desarrollo de la metodología de biorremediación	56
3.2.1 Actividades <i>in situ</i>	57
3.2.1.1 Movimiento de tierras	57
3.2.1.2 Construcción del filtro natural	60
3.2.2 Actividades <i>ex situ</i>	62
3.2.2.1 Trabajo de laboratorio	62
3.2.2.2 Trabajo de campo	65
3.3 Resultados	69
3.4 Interpretación y discusión de resultados	70
3.4.1 Fuente de carbono	70
3.4.2 Fuente de nitrógeno	73
3.4.3 Micronutrientes	74
3.4.4 Humedad	74
3.4.5 Cloruros	74
3.4.6 Metales pesados	75
3.5 Conclusiones	76

CONCLUSIONES	77
--------------	----

RECOMENDACIONES	78
-----------------	----

BIBLIOGRAFÍA	79
--------------	----

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos antiguos, antes de la llegada de los españoles, en el Perú se utilizaba el petróleo y sus derivados en diversas actividades. Actualmente, estos compuestos están presentes prácticamente en todas las actividades industriales y en muchas otras tan cotidianas como la automotriz en las que se practica el almacenamiento, transporte y manejo de combustibles. Por lo tanto, los hidrocarburos de petróleo generan una dependencia total en la sociedad.

La riqueza petrolera en el Perú se encuentra distribuida en tres zonas a lo largo de éste: la zona norte, la zona noreste y la zona del altiplano. La exploración y la explotación de este recurso se encuentran bajo la responsabilidad de diferentes empresas operadoras, actividades suscritas en contratos firmados con PERUPETRO, entidad gubernamental. El hidrocarburo explotado es almacenado y/o transformado en alguna de las siete refinerías que funcionan actualmente en el país.

No obstante al auge económico, la industria petrolera ha generado un marcado deterioro ambiental. De hecho, los hidrocarburos de petróleo son considerados como los contaminantes más comunes que se encuentran en la naturaleza, y están asociados con la producción y utilización de fuentes de petróleo. Desde finales de los años ochenta la atención del público mundial, en general, se ha centrado en los problemas ambientales generados por la contaminación con hidrocarburos de petróleo; se ha estimado que el vertimiento global anual de crudo se encuentra entre 1,7 y 8,8 millones de toneladas métricas, causado principalmente por fuentes antropogénicas, generando consecuencias devastadoras en el ámbito ecológico.

Por las características contaminantes de los hidrocarburos y por la falta de normatividad existente en años anteriores, se presentó contaminación de suelos, aguas subterráneas y del mar, evidenciando consecuencias en los ecosistemas señalados. No obstante con la implementación de leyes responsables a partir de 1993 y con el compromiso de solucionar dichos impactos negativos (pasivos ambientales), todas las compañías operadoras, estatales y privadas, firmaron sus respectivos PAMAs (Programas de Adecuación de Manejo Ambiental) iniciales con el objetivo de remediar las zonas afectadas, disminuir los impactos negativos en todo el proceso de la industria petrolera futura y crear políticas ambientales responsables para el futuro.

Por lo expuesto anteriormente, se propone el desarrollo del presente trabajo de tesis con la finalidad de evaluar la eficacia de la técnica de *landfarming* en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, bajo la aplicación de criterios de ingeniería y microbiología.

Para lograr un mejor entendimiento del tema, el desarrollo del trabajo incluye los conceptos teóricos que involucran el suelo como medio receptor de los productos contaminantes, las propiedades y comportamiento de los hidrocarburos en este ecosistema, las diferentes técnicas de remediación, la normativa ambiental nacional y la conjunción de todos estos factores aplicados a un caso práctico.

También se desarrollará en el último capítulo del presente trabajo de tesis, la mejora en la eficiencia de la técnica de *landfarming* al ser combinada con la técnica de biodegradación.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 EL SUELO

1.1.1 DEFINICIÓN

El suelo es la fina capa de material fértil que recubre la superficie de la tierra y es la cubierta superficial de la mayor parte del área continental (1).

El suelo nace y evoluciona bajo la acción de los factores activos del medio, el clima y la vegetación, sobre la matriz mineral originaria, constituyendo un medio dinámico, nunca estático. Son dos los procesos responsables de la formación de los suelos a través del tiempo: 1) la meteorización y desintegración de las rocas y de los minerales base; y, 2) la colonización y actividad de plantas y microorganismos.

Por lo anterior, los suelos proporcionan el soporte físico y los nutrientes para el crecimiento de las plantas y los microorganismos. Efectivamente, existe una amplia variedad de microorganismos (bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoos) que están presentes en los suelos, aunque las densidades de población de las mismas varían ampliamente. La superficie de los gránulos de un suelo constituye el lugar donde se produce la mayoría de las reacciones bioquímicas pertenecientes: 1) al ciclo de la materia orgánica, el nitrógeno y otros minerales; 2) a la meteorización de las rocas y; 3) a la toma de nutrientes por parte de las plantas (2).

Se puede definir el suelo de muchas maneras y desde muchos puntos de vista diferentes, no obstante teniendo en cuenta los objetivos del presente proyecto de tesis, es definido como

una mezcla compleja de materia mineral, materia orgánica, gases y agua, en proporciones variables y en equilibrio dinámico (1).

1.1.2 EDAFOGÉNESIS

La edafología es la ciencia que tiene como objetivo el estudio del suelo, definiéndolo como “ente natural organizado e independiente, con unos constituyentes, propiedades y génesis que son el resultado de la actuación de una serie de factores activos (clima, organismos, relieve y tiempo) sobre un material pasivo (la roca madre)” (1).

Teniendo en cuenta que el suelo es el resultado de una serie de interacciones entre diversos factores, a continuación se describirá su edafogénesis, a fin de entender el proceso de formación del mismo.

Los factores formadores de suelo son (1):

1.1.2.1 ROCA MADRE

La roca representa la fuente de los materiales sólidos. Generalmente, los minerales del suelo proceden directa o indirectamente de la roca madre (3).

Son muchos los parámetros de las rocas que inciden en la formación y evolución del suelo, de los cuales cabe destacar tres:

- ✓ Composición mineralógica
- ✓ Permeabilidad
- ✓ Granulometría

1.1.2.2 EL CLIMA

La decisiva acción del clima en la formación del suelo es debida a que éste regula el aporte de agua al suelo, así como su temperatura.

La disponibilidad y el flujo de agua regulan la velocidad de desarrollo de la mayoría de los procesos edáficos. Es por ello que la intensidad de percolación (infiltración), se considera un factor decisivo en la formación del suelo. La intensidad de percolación indica si en un suelo se produce suficiente exceso de agua como para producir el lavado y la translocación de materiales o si por el contrario el agua queda retenida sin que apenas se desplace hacia los horizontes profundos.

De igual manera el incremento de precipitaciones conlleva a un aumento del porcentaje de materia orgánica, ya que estimula el desarrollo de la cobertura vegetal.

Las acciones del clima también quedan reflejadas en muchas de las propiedades del suelo. Efectivamente, la capacidad de cambio (cantidad de iones adsorbidos en las superficies de los materiales del suelo) aumenta proporcionalmente a las precipitaciones, incluso los iones fijados muestran una dependencia. De igual manera, el incremento de las precipitaciones producirá una progresiva acidificación.

Finalmente, el clima también influye directamente en otros factores formadores como los factores bióticos y el relieve.

1.1.2.3 RELIEVE

Los procesos edáficos repercuten en el relieve y viceversa. Desde el punto de vista edáfico los elementos del relieve más importantes son: la inclinación y longitud de laderas, la posición fisiográfica y la orientación.

El relieve ejerce tres acciones fundamentales para la evolución del suelo:

Transporte: por acción de la gravedad en el relieve se produce el transporte de todo tipo de materiales. Dependiendo de su posición en el paisaje, el suelo se ve sometido a la acción de erosión (suelos esqueléticos) o por el contrario puede predominar la acumulación (suelos coluviales).

Características hídricas: el relieve también influye en la cantidad de agua que accede y pasa a través del suelo. En relieves convexos, el agua de precipitación circula por la superficie hacia las zonas más bajas del relieve creando un área de aridez local, mientras que lo contrario ocurre para las formas con relieve cóncavo.

Microclima: el relieve también modifica las características del clima edáfico, al influir en la temperatura y en la humedad en función de la inclinación (intensidad calorífica de las radiaciones solares), orientación (tiempo de incidencia de las radiaciones solares) y altitud.

1.1.2.4 ORGANISMOS

Básicamente los organismos ejercen dos funciones fundamentales (4):

- ✓ Constituyen la fuente de material original para la fracción orgánica del suelo (restos de origen vegetal y animal).
- ✓ Conllevan a importantes acciones de alteración de los materiales edáficos (proceso de humificación).

Por otro lado, los organismos presentes en un determinado suelo generan una serie de efectos sobre sus constituyentes y propiedades, como son:

- ✓ Tipo y abundancia de materia orgánica.
- ✓ Favorecen el desarrollo de la estabilidad y la estructura.
- ✓ Aumentan la porosidad del suelo.
- ✓ Favorecen el drenaje.
- ✓ Alteran el microclima.
- ✓ Evitan procesos de erosión.

1.1.2.5 EL TIEMPO

En términos generales el suelo se origina por una serie de procesos, en donde cada uno de ellos se desarrolla a diferentes velocidades; conllevando a que las propiedades del suelo se manifiesten de un modo desigual (Figura 1.1).

La velocidad de formación de un suelo es extraordinariamente lenta y depende del tipo de factores formadores de cada suelo (material parenteral, clima y otros). Por lo anterior, la velocidad de formación del suelo es muy variable, registrando valores que pueden ir desde 1 mm/año hasta 0,001 mm/año. Vale la pena recalcar que la velocidad de formación del suelo decrece con la edad.

En síntesis la formación del suelo tiene lugar como consecuencia de la interacción de los cinco factores formadores ya descritos anteriormente, distinguiendo dos etapas (1).

La etapa inicial comienza con la fragmentación de la roca madre. La desagregación del material parenteral facilitará la circulación del aire y del agua, favoreciendo la actividad biótica, conllevando a una alteración química del material. Los minerales de las rocas originales, dependiendo de la estabilidad, se alteran en mayor o menor medida, apareciendo en el suelo más o menos transformados. Por otra parte, los organismos vivos sufren al morir intensas transformaciones químicas desarrollándose un nuevo material orgánico denominado humus. Durante estos procesos de transformación del material, se desprenderán compuestos que harán parte de la fase sólida del suelo, así como la liberación de gases y agua.

Para la etapa final, todos los constituyentes liberados en la etapa inicial, sufren una serie de procesos de mezcla y diferenciaciones que si evolucionan bajo condiciones *in-situ* conducen a la formación del suelo.

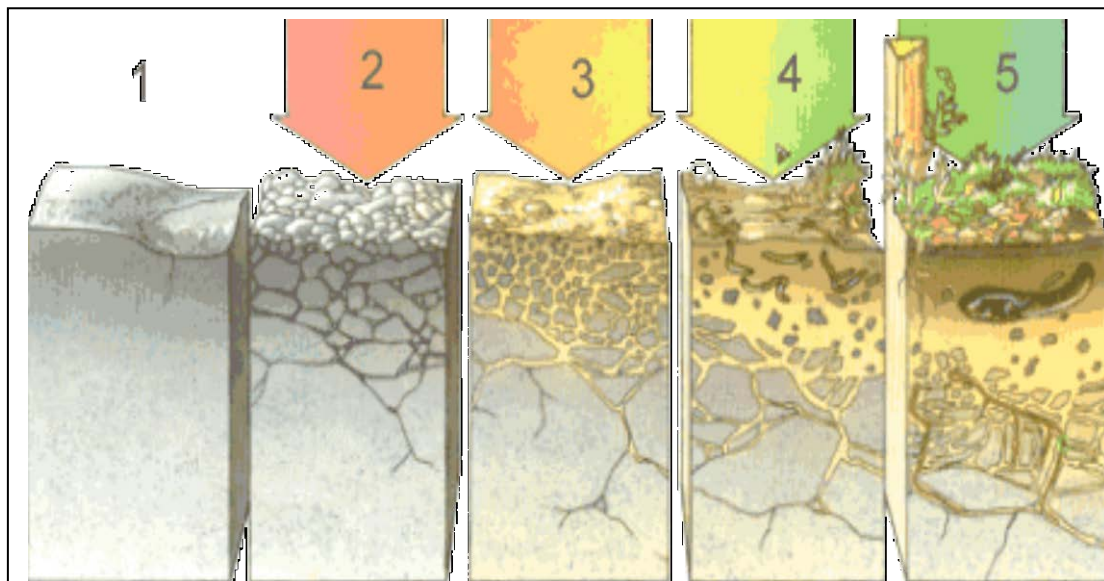


Figura 1.1.: Proceso de formación del suelo: 1. Roca madre; 2. Acción mecánica (cambios de temperatura, hielo, etc); 3. Acción química del agua y sales minerales; 4. Acción de los seres vivos; 5.- Acción conjunta de toda la materia orgánica e inorgánica.

1.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Dependiendo del criterio que se desea aplicar, los suelos se pueden clasificar de diferentes maneras, para el presente proyecto de tesis se tendrá en cuenta la clasificación basada en el tamaño de las partículas que lo conforman y en su uso agrícola.

1.1.3.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Los suelos se clasifican según el tamaño de sus partículas, considerando tres componentes principales: arcilla, limo y arena (5). En general, la clasificación según tamaño de partículas está basada en el análisis granulométrico por tamizado, método ASTM D422 (*American Society for Testing and Materials*), en donde la arcilla pasa por un tamiz de 0,002 mm (2 μm), los limos quedan retenidos en el tamiz de 0,002 mm pero pasan a través del tamiz de 0,05 mm y las arenas quedan retenidas en el tamiz de 0,05 mm, aunque pasan a través del de 2 mm. Aquellas partículas que quedan retenidas en el tamiz de 2 mm se clasifican como grava o piedra (5).

Las cantidades de arena, limo y arcilla en un suelo determinado, definen el grupo al que pertenece dicho suelo. Se suele emplear un triángulo de texturas para la clasificación de un suelo (Figura 1.2) según el tamaño del grano, dicho triángulo ha sido diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA) (6).

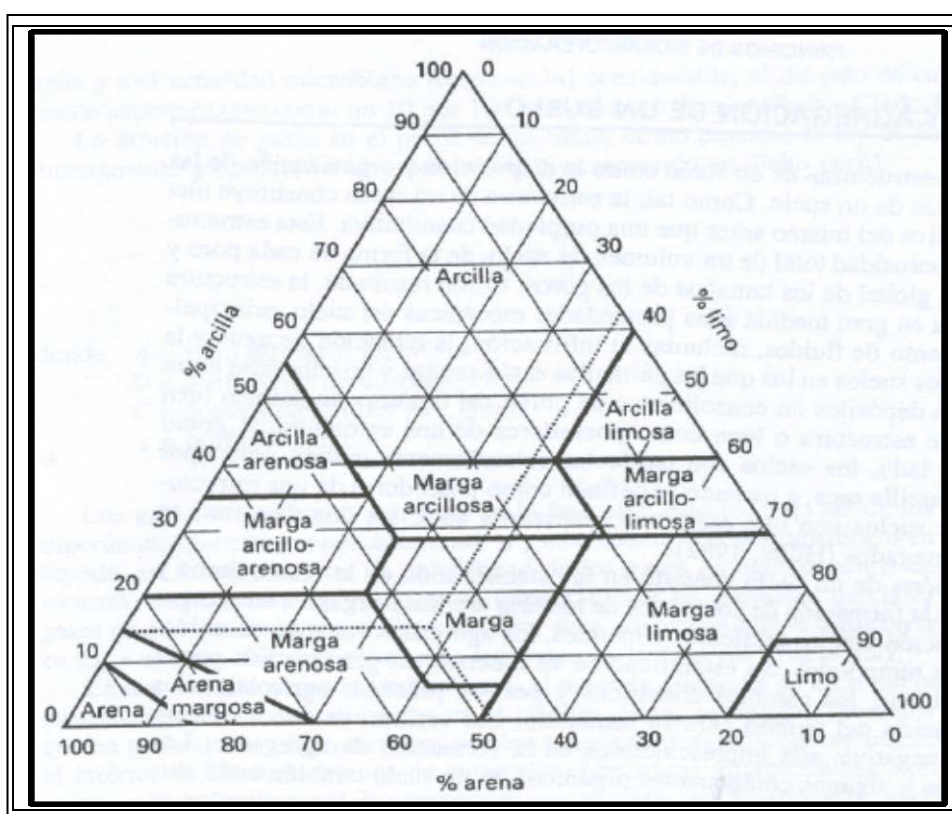


Figura 1.2.: Diagrama triangular de clasificación de suelos.
Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

En general, tanto arena como grava son consideradas como partículas gruesas en comparación con limos y arcillas, las cuales se clasifican como partículas finas. Los suelos con predominio del contenido de arena suelen tener una cantidad de retención de agua baja y una permeabilidad alta, por lo que tienen una buena aireación y drenaje. Los suelos con altos contenidos en limos, suelen tener problemas de formación de costras, lo cual resulta en una alta escorrentía superficial. En general, aquellos suelos con predominio del contenido de limo y arcillas suelen ser cohesivos y tienen una capacidad de retención de agua alta y una baja permeabilidad, lo que supone velocidades de infiltración y aireaciones bajas.

1.1.3.2 CLASIFICACIÓN POR CAPACIDAD DE USO MAYOR DEL SUELO (7)

A fin de evitar serios problemas como derrumbes, huaycos, erosión, destrucción de carreteras, casas, puentes y pérdidas de tierras agrícolas, entre otros, se ha creado la necesidad de clasificar las tierras del Perú, según su capacidad de uso mayor, para garantizar el buen uso de éstas. La clasificación está a cargo del Ministerio de Agricultura y los Gobiernos Regionales.

La capacidad de uso mayor de los suelos se basa en sus posibilidades para poder mantener actividades agrícolas, pecuarias o forestales dentro de márgenes económicos. Los factores que fijan estas posibilidades están determinadas a su vez por limitaciones como: condiciones climáticas, riesgos de erosión determinados por topografía y pendiente, características del suelo (propiedades físicas, morfología, salinidad, alcalinidad y fertilidad), condiciones de drenaje o humedad definidas por la presencia de niveles freáticos elevados, peligro de inundaciones, y presencia de capas densas poco permeables en el subsuelo.

El sistema de clasificación de tierras según su capacidad de uso mayor, fue establecido por el Reglamento de Clasificación de Tierras, según D.S. 0062/75-AG, del 22 de Enero y su ampliación fue establecida por ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales).

Este sistema agrupa las tierras en cuatro grupos:

GRUPO A - TIERRAS APTAS PARA CULTIVO EN LIMPIO

Estas tierras se caracterizan por una alta calidad agrícola, por lo cual pueden destinarse a la fijación de cultivos permanentes, pastos o la producción forestal. Estas tierras representan el 3,81% del territorio nacional, distribuidas en la costa (valles irrigados), sierra (zonas de topografía suaves y fondos de valles abrigados) y selva (terrazas de formación a lo largo de los principales ríos).

GRUPO C - TIERRAS APTAS PARA CULTIVOS PERMANENTES

Representan el 2,11% del territorio nacional, distribuyéndose en las tres regiones naturales continentales.

GRUPO P - TIERRAS APTAS PARA PASTOREO

Constituyen el 13,94% de la superficie territorial del país, estos pastos naturales se localizan principalmente en las regiones alto andinas. Las tierras aptas para producción forestal son las más representativas del país.

GRUPO X - TIERRAS DE PROTECCIÓN

Constituyen todas aquellas tierras que no reúnen las condiciones ecológicas mínimas requeridas para cultivos intensivos permanentes, pastoreo y producción forestal. Este grupo representa el 42,25% del territorio nacional.

1.1.4 ESTRUCTURA Y PERFIL DEL SUELO (1)

Se puede definir como estructura de un suelo, a la disposición y organización de sus diferentes partículas. Como tal, la estructura de un suelo constituye una propiedad cualitativa del mismo, antes que una propiedad cuantitativa. Esta estructura depende de la porosidad total de un volumen de suelo, de la forma del poro y de la distribución global de los tamaños de los poros.

El perfil del suelo es la denominación que recibe un corte vertical del mismo, mostrando todos sus horizontes, entendiéndose por tales, a las capas del suelo aproximadamente paralelas a la superficie del terreno, que se diferencian de las adyacentes por características como el color, la estructura, textura, consistencia, tipo y cantidad de organismos presentes, grado de acidez o alcalinidad.

Los horizontes se clasifican de la siguiente manera (Figura 1.3):

HORIZONTE O: capa de suelo en la que predomina el material orgánico. Es fundamental para el desarrollo de la vida vegetal, y su regeneración, si se deteriora, puede llevar mucho tiempo.

HORIZONTE A: son horizontes minerales formados en superficie o debajo del horizonte O, y se caracterizan por una acumulación de materia orgánica humificada mezclada con materia mineral.

HORIZONTE E: horizonte mineral, cuya principal característica es la pérdida de arcilla, hierro, aluminio o alguna combinación de ellos. Como resultado, en este caso, abundan las partículas de cuarzo y otros materiales resistentes tipo arena y limo.

HORIZONTE B: zona mineral con gran variabilidad en cuanto a la naturaleza predominante de las partículas (calcárea, silíceas) por debajo de los horizontes O, A ó E.

HORIZONTE C: capas de suelo poco afectadas por los procesos de formación de suelos y que no tienen las propiedades de los horizontes O, A, E ó B.

CAPA D: rocas duras tan coherentes que ya no pueden ser extraídas con métodos manuales.

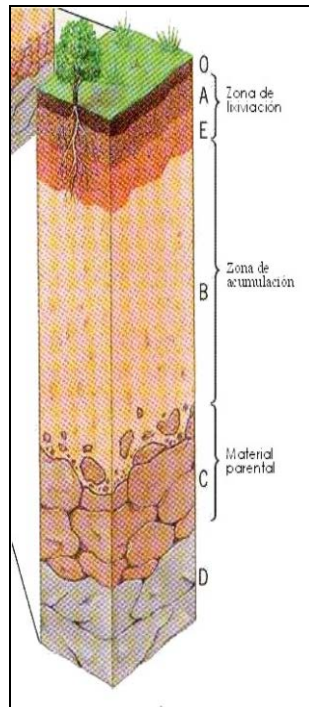


Figura 1.3.: Perfil del suelo – distribución de los horizontes.

1.1.5 COMPOSICIÓN DEL SUELO

Las propiedades físicas y químicas de los suelos influyen en gran medida sobre la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua y, por lo tanto, en la actividad biológica. Las propiedades más importantes que se incluyen son el tamaño y distribución de partículas, la porosidad, la humedad, composición química, fracción de arcilla, capacidad de intercambio de cationes y fracción orgánica (Figura 1.4).

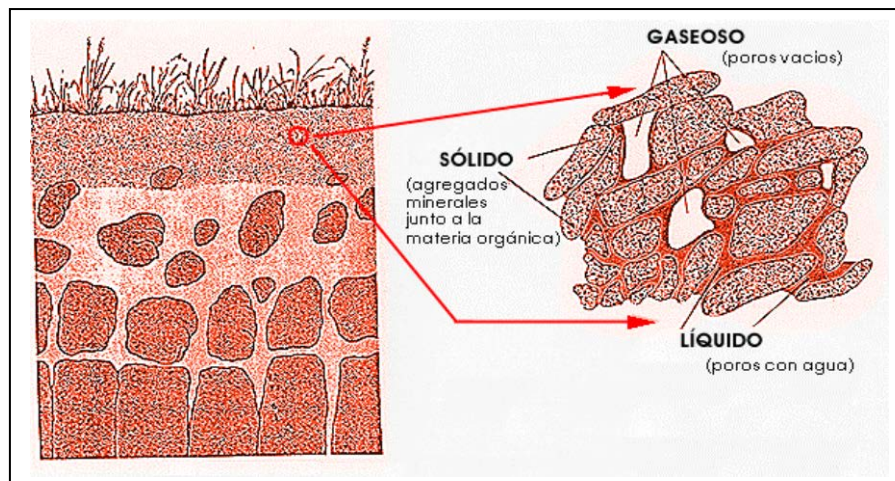


Figura 1.4.: Distribución de constituyentes en el suelo.

La matriz de un suelo está compuesta por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. Los materiales minerales constituyen los principales componentes estructurales de los suelos y suponen más del 50% del volumen total. El mineral predominante en un suelo es el dióxido de silicio (SiO_2). También se

encuentran en abundancia el aluminio y el hierro, mientras que el calcio, magnesio, potasio, titanio, manganeso, sodio, nitrógeno, fósforo y azufre están presentes en menor cuantía (2).

La composición química varía en gran medida de un suelo a otro y, en un mismo suelo, a diferentes profundidades.

El suelo es un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases tal y como se muestra en la Figura 1.5. La fase sólida está formada por los componentes inorgánicos y orgánicos que dejan un espacio (poros, cámaras, galerías, grietas y otros) en el que se hallan las fases líquida y gaseosa (8). El aire y el agua conjuntamente constituyen el volumen de poros, que, por lo general, ocupa entre el 25% y el 50% del volumen total (Figura 1.5.).

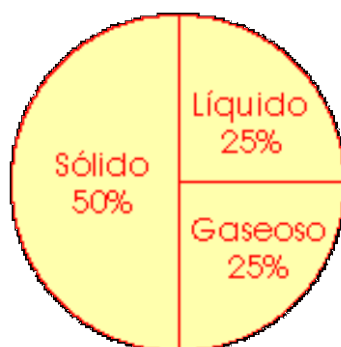


Figura 1.5.: Distribución de compuestos sólidos, líquidos y gaseosos en una matriz de suelo.

La proporción aire – agua varía considerablemente con la humedad del suelo. La materia orgánica oscila entre el 3% y el 6% del volumen, como valor medio, mientras que los organismos vivos ocupan menos del 1%.

1.1.5.1 CONSTITUYENTES SÓLIDOS

Como se mencionó anteriormente, en el suelo se encuentran componentes sólidos, líquidos y gaseosos; a su vez los primeros pueden ser divididos en compuestos minerales y orgánicos.

MINERALES: dentro de estos compuestos se pueden encontrar minerales poco alterables, minerales alterables, minerales arcillosos (producto de la transformación de las rocas o de la neoformación desde otros minerales anteriores) y fases amorfas, en las que se agrupan los oxihidróxidos producidos en la alteración. Esta variedad que se observa, hace que cualquier elemento químico pueda tener presencia en el suelo de muy diversas maneras; se puede encontrar por ejemplo al hierro o al aluminio en silicatos, en óxidos amorfos, en formas cristalinas secundarias, en complejos o incluso ligados a la materia orgánica.

MATERIA ORGÁNICA: la constituye un número indeterminado de sustancias, muchas de ellas desconocidas, que resultan de la lixiviación de la primera y superficial capa orgánica del suelo (horizonte O), constituida por restos más o menos transformados de las plantas (follaje) y/o restos animales. Todas estas sustancias se pueden clasificar según el tipo de extracción, en ácidos húmicos, fúlvicos y humina.

1.1.5.2 CONTENIDO DE AGUA

Los espacios existentes entre los agregados estructurales del suelo son ocupados por agua, aire o ambos, a la vez según el tipo de poro y el grado de humectación del terreno.

La humedad de un suelo influye en gran medida sobre la actividad biológica. El agua es el componente principal del protoplasma celular y un suministro adecuado de agua es esencial para el crecimiento y estabilidad biótica. Un suelo con una humedad demasiado baja da lugar a zonas secas y a una disminución en la actividad microbiana. Sin embargo, demasiada humedad inhibe el intercambio de gases y el movimiento de oxígeno a través del suelo conllevando a la aparición de zonas anaeróbicas, hecho que daría lugar a la eliminación de microorganismos aeróbicos y el aumento de la presencia de anaerobios estrictos o anaerobios facultativos.

Tradicionalmente, se ha clasificado el agua en tres tipos: gravitatoria, capilar y osmótica (9). El agua gravitatoria, como el propio término indica, es el agua que se mueve en sentido descendente bajo la influencia de la gravedad. Este tipo de agua es la que se encuentra disponible para los microorganismos y las raíces de las plantas, jugando un papel importante en el transporte de contaminantes y otras materias. El agua capilar, aquella retenida en los poros, también está disponible para los microorganismos de un suelo. Y finalmente el agua osmótica es aquella retenida por las partículas de arcilla y humus y, al contrario de los otros dos tipos de agua, no está al alcance de los microorganismos del suelo y las raíces de las plantas.

La capacidad de campo es un término frecuentemente empleado, asociado al porcentaje de humedad del suelo. Veihmeyer y Hendrickson, los primeros en emplear el término “capacidad de campo”, la definieron como la cantidad de agua retenida en un suelo, una vez el exceso de agua ha desaparecido y la velocidad de movimiento descendente ha disminuido, lo que suele ocurrir durante los dos a tres días siguientes después de haber llovido o regado, en suelos permeables de estructura y textura uniforme (10). La capacidad de campo de un suelo oscila normalmente entre el 10% y el 30% en peso y en función del contenido de arcilla.

1.1.5.3 COMPONENTES GASEOSOS

Existe una relación directa entre las cantidades de agua y aire contenidas en un volumen de suelo, ya que aquel espacio de poros que no esté ocupado por agua lo estará por gas. Los principales gases que constituyen un suelo son, en esencia, los mismos que se encuentran en la atmósfera terrestre: nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono. Sin embargo, las concentraciones relativas de estos gases, en concreto del oxígeno y del dióxido de carbono, dependen de la aireación del suelo y de la actividad microbiana en todo el perfil. En la atmósfera, el oxígeno supone el 20% de la composición del aire, mientras que el dióxido de carbono constituye únicamente el 0,03%. Sin embargo, en suelos con buena aireación la concentración de oxígeno puede oscilar entre el 18% y el 20% mientras que la concentración del dióxido de carbono puede alcanzar valores tan altos como del 1% al 2%. En suelos con menor aireación, tales como suelos arcillosos con un alto contenido en agua y una actividad microbiana considerable, el dióxido de carbono puede suponer tanto como un 10% del volumen del aire (11).

Los gases se pueden mover bien en la fase gaseosa, esto es, a través de los poros, suponiendo que están conectados entre sí y en contacto con la atmósfera, o en la fase líquida, en forma disuelta. La solubilidad de los gases en agua depende de varios factores, incluyendo el propio gas, la temperatura y las presiones parciales de los gases en el espacio de poros. Sin embargo, debe advertirse que la difusión de gases en el agua es del orden de diez mil veces más lenta que en la fase gaseosa (Tabla 1.1).

Tabla 1.1.: Constantes de difusión de los principales gases, incluido la solubilidad en agua a 20 °C.

Gas	Difusividad, cm ² /s		Coeficiente adimensional de la Ley de Henry
	Aire	Agua	
CO ₂	0,161	0,177 x 10 ⁻⁴	1,07
O ₂	0,205	0,180 x 10 ⁻⁴	30,7
N ₂	0,205	0,164 x 10 ⁻⁴	60,4

Fuente: Paul, E.A.; Clark, F.E., Soil microbiology and biochemistry, 1989. (11)

En términos de actividad microbiana, el nivel de aireación de un suelo no es tan importante como las condiciones en el interior de los agregados. Aquellos suelos que en general están bien aireados pueden tener zonas microscópicas anaerobias en el interior de las formaciones de agregados. Las zonas microscópicas anaerobias, constituyen una explicación relativa a la presencia de bacterias anaerobias, como aquellas pertenecientes al género *Clostridium* spp, en las capas superiores de un suelo.

Se ha comprobado que aquellos terrones de tierra de diámetro superior a 6 mm, no contienen oxígeno en su zona central. Paradójicamente, son las bacterias aerobias las que dan lugar a las condiciones que las bacterias anaerobias necesitan para sobrevivir. Al mismo tiempo que colonizan las zonas microscópicas, las bacterias aerobias consumen todo el oxígeno allí almacenado, dando lugar entonces a condiciones anaerobias y permitiendo a las colonias anaerobias desarrollarse. Se estima que la transición de condiciones aerobias a anaerobias tiene lugar para valores de la concentración de oxígeno inferior al 1%. Al mismo tiempo, se cree que manteniendo una aireación adecuada del suelo, el porcentaje de espacio de los poros ocupado por aire no disminuirá por debajo de un 10% (11).

1.1.5.4 BIOLOGÍA DEL SUELO (Figura 1.6)

El suelo representa el medio físico que sustenta la vida de diversas especies tanto animales como vegetales (12).

La mayoría de los organismos que viven en el suelo participan en el complejo proceso de descomponer la materia orgánica bruta en humus, incluyendo en esta afirmación desde las lombrices de tierra hasta los microorganismos saprofíticos (4).

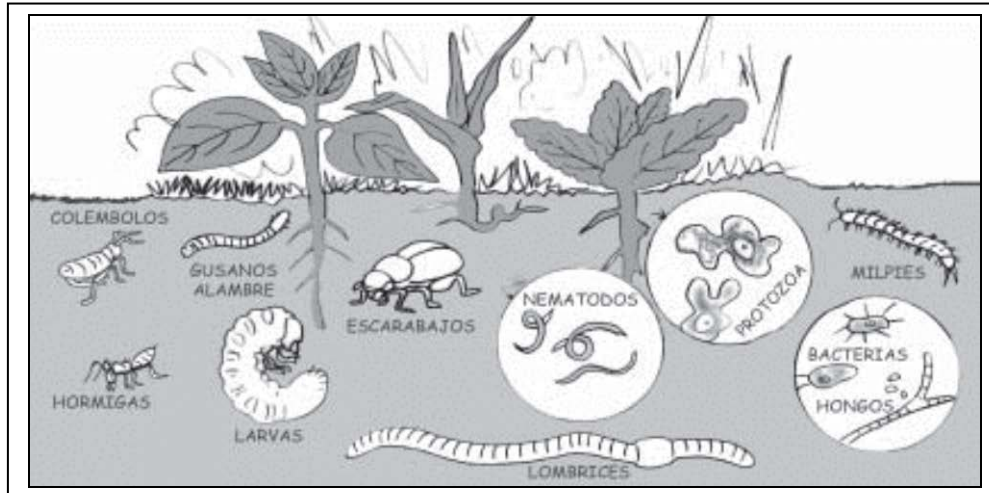


Figura 1.6.: Diversidad biótica de un perfil del suelo.

Los restos vegetales y animales se transforman en materia orgánica en un proceso complejo, variando su velocidad y el resultado final en función de los organismos presentes y de otras circunstancias como el clima, humedad, aireación del suelo, pH (óptimo entre 6 y 8) y la disponibilidad de nutrientes. Conviene aclarar que con respecto a los nutrientes, se hace referencia a nitrógeno, fósforo, azufre, calcio, magnesio, potasio y oligoelementos como Fe, Mn, Zn, Cu, Mb y otros.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el suelo no es un medio uniforme y continuo, sino que está compuesto por comportamientos discretos de los que sólo algunos de ellos son hábitats microbiológicos.

En un suelo genérico, la mayor parte de la población microbiana se localiza aproximadamente en los primeros 15 cm. del suelo, ya que los niveles de nutrientes tienen valores altos y la accesibilidad del oxígeno en esta franja es grande. El área circundante a las raíces de las plantas posee una gran variedad de microorganismos por la gran abundancia de materia orgánica en la zona, conocida como rizósfera (Figura 1.7.).

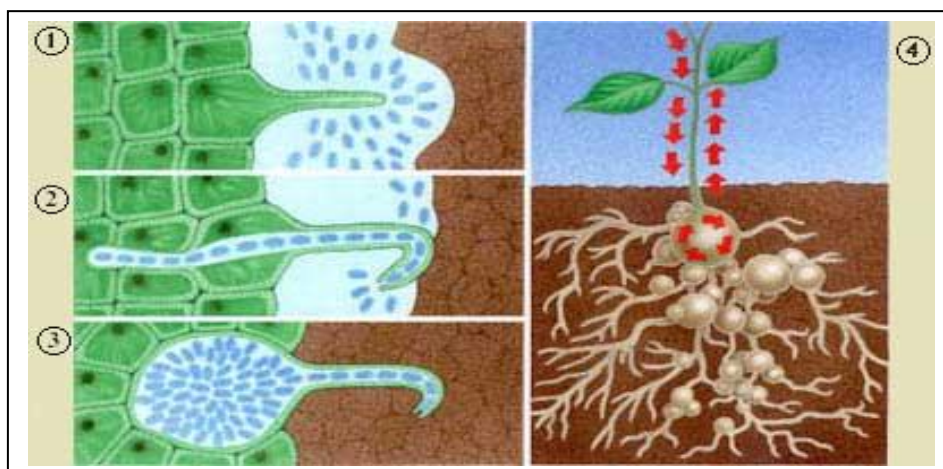


Figura 1.7.: Determinación de la rizósfera.

1.2 EL PETRÓLEO

1.2.1 EL PETRÓLEO Y SUS CARACTERÍSTICAS

El petróleo es una mezcla de numerosos hidrocarburos, que son los compuestos químicos formados por átomos de carbono e hidrógeno; etimológicamente el nombre de petróleo significa “aceite de piedra”, y su origen son los restos orgánicos que han sufrido la acción microbiana, y que fueron depositados en los fondos de mares someros (de poca profundidad).

Los yacimientos de petróleo se encuentran acompañados en la mayoría de casos con agua que se deposita por debajo del petróleo y el gas que se ubica en la superficie. Esto es una generalidad, pero no siempre se encuentran juntos, como también varían sus volúmenes. Para encontrar hidrocarburos en rocas sedimentarias es necesario que existan ciertas condiciones favorables como: una roca madre con alto contenido de carbono orgánico (restos animales o vegetales) y altas temperaturas durante millones de años que conviertan al carbono orgánico en hidrocarburos; por acción del calor y la presión, los hidrocarburos emigran por vías de salidas a una roca que permite el depósito adecuado poroso y permitiendo su infiltración y almacenamiento en tipos de roca como caliza y arenisca. Finalmente, sobre el depósito existe roca impermeable, formando una estructura subterránea de materiales como pizarras, arcillas o sal encima del depósito.

Las características más relevantes del petróleo son las siguientes:

- ✓ Color: amarillento hasta negro.
- ✓ Olor: varía de aromático a desagradable.
- ✓ Combustión: positiva, arde con facilidad.
- ✓ Calorías: 11 000 calorías por kilogramo.

El petróleo es una mezcla de diferentes grupos de moléculas de hidrocarburos que coexisten en fases sólida, líquida y gaseosa dificultando su caracterización. Las toxicidades y potenciales de los impactos ambientales de las diferentes moléculas varían considerablemente dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo. Se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes.

Dentro de los hidrocarburos más comunes se encuentran: la gasolina, el diesel combustible, fluidos hidráulicos, el crudo y los aceites lubricantes.

El crudo está compuesto típicamente entre el 50 y el 98% de hidrocarburos y puede contener también cantidades significativas de otros elementos, tales como azufre (0-10 %), nitrógeno (0-1 %), oxígeno (0-5 %) y metales pesados (ppm).

Las moléculas de crudo, sin embargo, pueden ser clasificadas en familias que tienen propiedades similares, las cuales se registran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2.: Familias de hidrocarburos.

Nombre familia	Ejemplos	Fórmula
Alcanos	Metano	CH ₄
Alquenos (colefinas)	Propeno	C ₃ H ₆
Alquinos (acetilenos)	Etino	C ₂ H ₂
Cicloalcanos (naftalenos, ciclo para-finas)	Ciclopropano	C ₃ H ₆
Aromáticos	Benceno	C ₆ H ₆
Poli aromáticos	Naftaleno	C ₁₀ H ₈
Alcoholes	Etanol	CH ₃ OH
Ácidos	Ácido acético	C ₂ H ₄ OH
Aminas	Metilamina	CH ₃ NH ₂

Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo.

Los hidrocarburos del petróleo corresponden a una amplia serie de compuestos que se dividen en tres grandes grupos: los alcanos (parafinas), los alquenos y los aromáticos.

Las cadenas lineales de hidrocarburos constituyen las parafinas, principales constituyentes del crudo, las cuales se encuentran en productos refinados como la gasolina, el kerosene, el diesel, etc. Cada producto es el resultado de la combinación de varios compuestos hidrocarbonados diferentes unos de otros (propiedades físico químicas). Cuando las cadenas son ramificadas se obtienen las isoparafinas, y si presentan enlaces dobles se denominan oleofinas. Finalmente, se pueden encontrar a nivel molecular estructuras cíclicas definiendo los naftenos, y bajo ciertas circunstancias se presentan dobles enlaces (anillo bencénico) originando los compuestos aromáticos (benceno, tolueno, xileno, naftaleno, antraceno, pireno, entre otros).

Al aumentar el peso molecular de los hidrocarburos las estructuras se hacen verdaderamente complejas y difíciles de identificar químicamente con precisión. Un ejemplo son los asfaltenos que forman parte del residuo de la destilación al vacío.

Son miles los compuestos químicos que constituyen el petróleo (hidrocarburos de petróleo), y, entre muchas otras propiedades, estos compuestos se diferencian por su volatilidad, dada por su temperatura de ebullición. Al calentarse el petróleo, se evaporan preferentemente los compuestos ligeros (de estructura química sencilla y bajo peso molecular), de tal manera que conforme aumenta la temperatura, los componentes más pesados van incorporándose al vapor.

Las curvas de destilación TBP (temperatura de ebullición real) distinguen a los diferentes tipos de petróleo y definen los rendimientos que se pueden obtener de los productos por separación directa. La industria mundial de hidrocarburos líquidos clasifica el petróleo de acuerdo a su densidad API (parámetro internacional del Instituto Americano del Petróleo diferenciando las calidades del crudo relacionado en Tabla 1.3).

Tabla 1.3.: Clasificación del petróleo según densidad API.

Aceite crudo	Densidad (g/cm³)	Densidad grados API
Extrapesado	> 1,0	10,0
Pesado	1,0 – 0,92	10,0 – 22,3
Mediano	0,92 – 0,87	22,3 – 31,1
Ligero	0,87 – 0,83	31,1 – 39,0
Superligero	< 0,83	> 39,0

Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo.

1.2.2 HISTORIA DE LA EXPLOTACIÓN PETROLERA EN EL PERÚ

Desde tiempos antiguos se utiliza el petróleo en el Perú. Antes de la llegada de los españoles algunos historiadores señalan que, en tiempo prehispánico, se usaba brea para producir fuego, para generar luz, lo cual era frecuente en época de festividades. En la época de la colonia, los españoles utilizaban el petróleo para calafatear sus embarcaciones, así como también empleaban la brea para algunas construcciones.

En el año 1863 se inició la explotación petrolera en el Perú con la perforación del primer pozo, en la zona de Zorritos; luego del período comprendido entre los años 1871 y 1878 apareció la empresa Faustino Piaggio e Hijos. En 1901 entró en operación la empresa Petrolera Lobitos iniciando una serie de perforaciones en busca del llamado “oro negro”, alcanzando su mayor auge durante las décadas del 60 y 70, donde destacó la empresa Internacional Petroleum Company (IPC), posteriormente la explotación estuvo a cargo de la empresa estatal Petróleos del Perú o Petroperú, que junto con la explotación de los yacimientos del norte y de la selva en el año 1977 efectuado por OXY, abasteció la demanda interna. En los años siguientes se continuó con las exploraciones en la costa y Amazonía.

Durante el año 1983, la empresa Shell Prospecting and Development, en sus trabajos de exploración de 5 pozos en los lotes 88A y 88B en busca de petróleo, descubre un importante yacimiento de gas natural sobre el cual el país pone sus esperanzas para modificar el consumo de los recursos energéticos. Para su explotación se forma el consorcio Shell-Mobil que se hace cargo del proyecto del gas de Camisea, suscribiendo el 17 de mayo de 1996 un contrato con PERUPETRO para explorar y desarrollar el yacimiento. El acuerdo consideraba tres etapas que eran: la perforación de pozos de exploración, la producción de gas natural, y el traslado de dicho combustible a Lima y su comercialización; sólo se cumplió con la primera parte, ya que el consorcio anunció su retiro del proyecto antes de dar inicio a la segunda parte del proyecto, el 16 de julio de 1998. Posteriormente en mayo de 1999, la Comisión de Promoción de la Inversión Privada (COPRI) acuerda llevar adelante un proceso de promoción con la finalidad de desarrollar el proyecto de Camisea mediante un esquema segmentado, que comprende módulos independientes de negocios; inmediatamente después el 31 de mayo del mismo año, el Comité Especial del Proyecto Camisea (CECAM) convoca a un concurso público internacional con la finalidad de otorgar el contrato de licencias para la explotación de Camisea y las concesiones de transporte de líquidos y gas desde Camisea hasta la costa y distribución de gas en Lima y Callao.

Finalmente en diciembre del 2000, se suscribe los contratos para el desarrollo del Proyecto Camisea con los consorcios adjudicados de los concursos llevados a cabo.

Por lo anterior, el módulo de explotación de hidrocarburos en el Lote 88 – Yacimientos de Gas de Camisea, fue adjudicado al consorcio formado por las empresas Pluspetrol (Argentina), Hunt Oil Co. (USA), SK Corp. (Corea) e Hidrocarburos Andinos (Argentina) y el módulo de transporte del gas y de los líquidos del gas desde Camisea hasta la costa y la distribución del gas en Lima y Callao, fue adjudicado al consorcio formado por las empresas Techint (Argentina), Pluspetrol (Argentina), Hunt Oil Co. (USA), SK Corp. (Corea), Sonatrach (Argelia) y Graña y Montero (Perú). Cabe explicar, que el esquema diseñado para el curso previo a la adjudicación comprendió dos módulos que fueron ofrecidos en la modalidad de proyectos integrales, lo cual significa que se fijaron parámetros objetivos a cumplir y se dejó en manos de los inversionistas la decisión y flexibilidad para elegir los detalles técnicos de diseño, construcción y operación, dentro del cumplimiento de las normas vigentes en el Perú.

Para desarrollar el proyecto inicial de explotación, el contratista (consorcio liderado por Pluspetrol) estableció dos áreas geográficas bien diferenciadas para la ejecución de las obras. El área *upstream* que abarca todas las obras a realizar en la zona de Camisea y el área del *downstream* que abarca las obras a realizar en la zona de Pisco.

Las principales obras en el área del *upstream* son:

- ✓ Perforación de pozos.
- ✓ Sistema de recolección y transporte de gas natural (*flow lines*).
- ✓ Planta de separación de líquidos del gas natural.
- ✓ Planta de compresión de gas para reinyección y para transporte.

Las principales obras en el área del *downstream* son:

- ✓ Planta de fraccionamiento de líquidos del gas natural.
- ✓ Planta de *topping* de condensados.
- ✓ Sistema de almacenamiento y embarque de productos.

Dentro del área del *upstream*, el contratista ha incluido un proyecto de adquisición de sísmica para mejorar el conocimiento de los yacimientos de gas.

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para las obras en la zona de Camisea (*upstream*) fue aprobado el 17 de Diciembre de 2001, lo que permitió a partir de esa fecha se dar inicio a las obras en dicha zona.

En el caso del EIA para las obras en la zona de Pisco (*downstream*) con fecha 4 de Abril de 2003 la DGAA (Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Energía y Minas) otorgó una aprobación condicionada, lo que permitió solamente el inicio de las obras del componente *onshore* de la planta de fraccionamiento. El 11 de julio de 2003 la DGAA dio la aprobación definitiva al EIA del proyecto planta de fraccionamiento de GNL (líquidos de gas natural) e instalaciones de carga y tubería submarina en playa Lobería, Pisco, con lo cual se autorizó la ejecución del mencionado proyecto.

En lo referente al avance de las diferentes obras anteriormente mencionadas, cabe señalar que el 05 de Abril de 2004 se puso en marcha el proyecto con la apertura del pozo SM 1002 (San Martín 1002) y la presurización del cluster San Martín 1. De igual manera, para el mismo período se ha puesto en marcha la planta de separación en Malvinas, mientras que dos meses después se inició el llenado del gasoducto Camisea a Lima, dando inicio a la fase de extracción comercial en el contrato de explotación de yacimientos de Camisea-Lote 88.

Paralelamente, en marzo de 2002 se recibió la aprobación del Estudio de Impacto Ambiental de los sistemas de transporte de gas natural y de los líquidos del gas natural de Camisea con lo que la empresa contratista, Techint, dio inicio a la ejecución de las obras de esta parte del proyecto.

En la actualidad, se ha registrado la culminación de las obras de construcción de ductos de los frentes selva, sierra y costa; de igual forma se continúa con los trabajos de construcción de las estaciones de bombeo y control de presión, así como los trabajos de remediación y control, de erosión a lo largo de la ruta de los ductos.

Finalmente, y en lo referente al sistema de distribución de gas en Lima y Callao, esta parte del proyecto está a cargo de la empresa GNLC, la cual pertenece al grupo Tractebel. Dicho sistema comprende una red de tuberías para el transporte del gas desde el *City Gate* ubicado en Lurín hasta la estación Terminal localizada en Ventanilla. Al mes de abril de 2004, se ha registrado un avance del 98,9% en la instalación del ducto principal, un 99% en la construcción de *City Gate*, y la continuidad de las otras obras pertenecientes al proyecto (13).

1.2.3 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

Los yacimientos petrolíferos del Perú están distribuidos en relación con las 18 cuencas sedimentarias que se encuentran influenciadas con los procesos tectónicos de las placas de Nazca y Continental, además también la acción de las fuerzas ejercidas por el levantamiento de los Andes. Estas cuencas cubren un área total de 81 millones de hectáreas. Sin embargo, aún cuando el nivel de actividad exploratoria se ha incrementado en los últimos años en el país, no todas las áreas con potencial vienen siendo trabajadas en busca de hidrocarburos (14).

Geográficamente las zonas donde hay petróleo son las siguientes:

Zona norte: formada por las áreas que abarcan el zócalo continental, la franja costera del flanco occidental de los andes del norte, donde se ubican las cuencas de Talara, Progreso, Lancones y Sechura. La primera cuenca en explorarse fue la de Talara que se mantiene en producción desde el 1863, habiéndose extraído hasta el mes de Diciembre de 1997, más de 1354,2 millones de barriles de Petróleo (15). Las otras cuencas se encuentran en la plataforma marina o la franja costera.

Zona noreste: comprende la región selvática, donde se encuentran las cuencas del Marañón, Ucayali y Madre de Dios; en esta zona se han ejecutado los trabajos más intensos de exploración desde la década del 70, produciendo según el Ministerio de Energía y Minas la cantidad registrada en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4.: Producción de petróleo registrada hasta diciembre 1997 en las cuencas de Marañón y Ucayali.

Cuenca	Producción (millones de BBLs)
Marañón	751,7
Ucayali	20,6

Fuente: Ministerio de Energía y Minas.

En esta zona también se encuentran otras cuencas que son motivo de interés en trabajos exploratorios y corresponden a las cuencas de Santiago y del Huallaga.

Zona del altiplano: abarca la cuenca del Titicaca que se extiende entre los departamentos de Puno, sur del Cuzco y una pequeña parte del Apurímac; en Puno se encontró petróleo pero su producción no ha sido significativa, sólo se han extraído 200 mil barriles de petróleo aproximadamente.

1.2.4 RESERVAS PETROLERAS Y GAS NATURAL

Reservas probadas: son aquellas que han sido probadas mediante pozos de perforación para conocer el volumen explotable, y se subdividen en: reservas probadas desarrolladas, reservas no desarrolladas y reservas no asignadas. Hasta el año 1996 el total de la reserva probada del Perú era de 340 266 miles de barriles, representando el 8% del total nacional.

Para el año de 2004, las reservas probadas de petróleo registraron un incremento de 7,6% como consecuencia de la identificación de nuevas ubicaciones para perforar, nuevos reacondicionamientos, mejoras en el comportamiento productivo y reclasificación de reservas.

Reservas probables: son las que son estimadas y que tienen que realizarse mayores pruebas de comprobación, para determinar la posibilidad de su explotación; se conoce su existencia pero no se les puede clasificar como probadas; en el país suman un total de 352 190 miles de barriles de reservas probables, que representan el 8% del total nacional, dato suministrado por PERUPETRO en 1997.

Reservas posibles: son las que tienen que ser comprobadas y que constituyen el mayor número que se cuenta en el Perú, con un total de 3 756 968 de barriles, que representan el 84% del total nacional.

A continuación la Figura 1.8 registra las reservas de petróleo en el Perú entre el período comprendido entre 1996 y 2006.

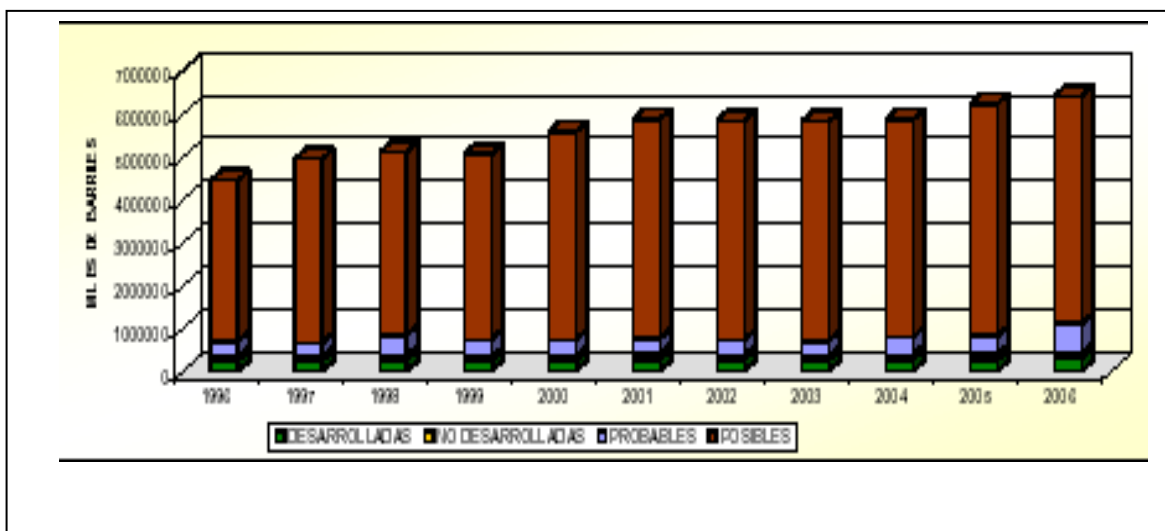


Figura 1.8.: Reservas de petróleo en el Perú, 1996– 2006.

Fuente: Estadística petrolera 2007. PERUPETRO. 2007.

Los yacimientos San Martín y Cashiriari, conjuntamente conocidos como Bloque 88, Camisea, albergan una de las más importantes reservas de gas natural no asociado en América Latina. El volumen de gas *in situ* probado es de 8,7 trillones de pies cúbicos (TPC) con un estimado de recuperación final de 6,8 TPC de gas natural, correspondiendo a un factor de recuperación igual a 78%, y 411 millones de barriles de líquidos de gas natural asociados (propano, butano y condensados).

El potencial del Bloque 88 está estimado en 11 TPC de gas natural (volumen de gas *in situ* probado más (+) probable). El estimado de recuperación final considerando los volúmenes probados más los probables es de 8,24 TPC de gas y 482 millones de barriles de líquido de gas natural. Las reservas de Camisea son diez veces más grandes que cualquier otra reserva de gas natural en el Perú.

A continuación la Figura 1.9 registra las reservas de gas en el Perú entre el período comprendido entre 1996 y 2006.

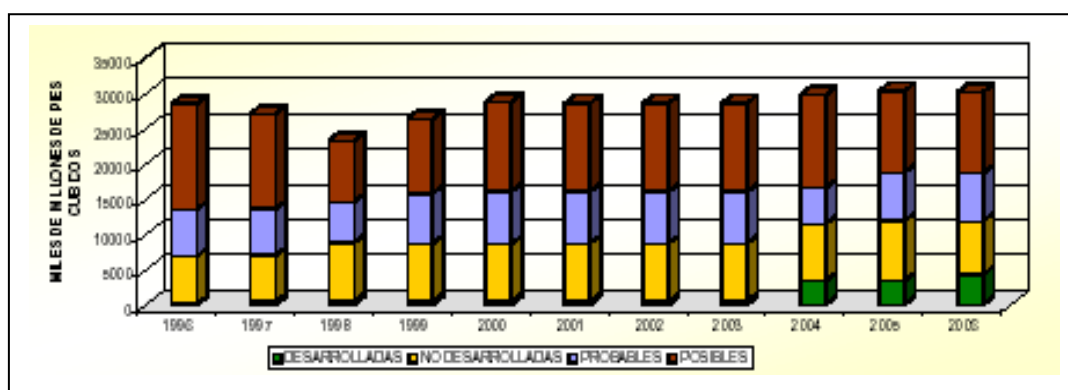


Figura 1.9.: Reservas gas natural en el Perú, 1996- 2006.

Fuente: Estadística petrolera 2007. PERUPETRO. 2007.

A continuación se registra en la Tabla 1.5 los datos registrados por PERUPETRO al 31 de Diciembre de 2005 con respecto a las reservas de hidrocarburos líquidos teniendo en cuenta la zona geográfica y en la Tabla 1.6 los datos con respecto a reservas de gas natural.

Tabla 1.5.: Reservas de hidrocarburos líquidos al 31 de diciembre de 2005.

RESERVAS DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS AL 31 DE DICIEMBRE DE 2005					
EN MILLONES DE BARRILES					
ÁREA	PROBADA			PROBABLES	POSIBLES
	DESARROLLADA	NO DESARROLLADA	TOTAL		
ÁREAS OPERADAS					
COSTA	50 851	27 275	78 126	17 672	1 403 853
ZÓCALO	77 355	43 865	121 220	45 492	76 211
SELVA NORTE	131 751	49 403	181 154	209 005	1 146 615
SELVA CENTRAL	9 128		10 088	8 521	502 069
SELVA SUR	213 580	474 090	687 670	246 700	190 460
SUB - TOTAL	482 665	594 633	1 078 258	527 390	3 319 208
ÁREAS NO OPERADAS					
SUB - TOTAL	-	-	-	205 030	2 482 940
TOTAL PAÍS	482 665	594 633	1 078 258	732 420	5 802 148

Tabla 1.6.: Reservas de gas natural al 31 de diciembre de 2005.

RESERVAS DE GAS NATURAL 31 DE DICIEMBRE DE 2005					
EN 10 ⁹ PIES CÚBICOS					
ÁREA	PROBADA			PROBABLES	POSIBLES
	DESARROLLADA	NO DESARROLLADA	TOTAL		
ÁREAS OPERADAS					
COSTA	0,128	0,166	0,294	1,077	3,561
ZÓCALO	0,193	0,020	0,213	0,661	0,649
SELVA NORTE	0,000	0,000	0,000	0,088	0,061
SELVA CENTRAL	0,221	0,000	0,221	0,081	0,479
SELVA SUR	2,850	8,350	11,200	3,880	1,464
SUB – TOTAL	3,392	8,536	11,928	5,787	6,214
ÁREAS NO OPERADAS					
SUB – TOTAL	0,000	0,000	0,000	1,030	5,3,98
TOTAL PAÍS	3,392	8,536	11,928	6,817	11,612

Fuente: PERUPETRO 2007.

1.2.5 EXPLORACIÓN

La localización de yacimientos petrolíferos se realiza mediante los métodos de exploración: sísmicos, gravimétricos y perforación exploratoria; el más empleado es el método sísmico, el cual se ejecuta con explosiones dentro de los pozos para registrar en los sismógrafos las líneas sísmicas.

La aplicación de los métodos sísmicos y gravimétricos son buenos indicadores, sin embargo la única garantía de probar que en un yacimiento hay petróleo es mediante la

perforación de pozos, conocida como perforación exploratoria, permitiendo a los geólogos establecer las características de las estructuras del depósito, realizar los cálculos del volumen, la posición del yacimiento, diseñar los pozos de perforación y estimar los costos de inversión así como las instalaciones necesarias para tratar los hidrocarburos (petróleo y gas). En esta etapa también se va a determinar los números de pozos a perforar, su profundidad, lugar y se va a calcular la velocidad de producción de cada uno.

En el año 1996 solamente se perforaron 4 pozos exploratorios, uno en el noroeste, dos en la selva, y uno en la sierra sur, no encontrándose petróleo en ninguno de ellos. El número se incrementó en el año 1997 a 10 pozos exploratorios, distribuidos de la siguiente manera: uno en el noroeste, uno en el zócalo continental, siete en la selva y uno en la sierra, de todos éstos solamente uno tuvo resultados positivos que fue el pozo llamado la Casita en el lote XIII-34-IX, ubicado en la costa norte, correspondiendo solamente a gas.

Las exploraciones en los últimos años no han sido favorables en el sector petrolero, tal y como muestra la Figura 1.10 y Figura 1.11, ya que se han encontrado solamente pozos secos, a pesar de los incentivos y facilidades dadas por el gobierno para que las empresas realicen trabajos de exploración y explotación en las regiones de la amazonía, en el norte y el zócalo continental. Hasta el mes de octubre de 1998 se habían firmado 43 contratos de exploración y explotación con un compromiso de inversión mínimo de US\$ 1139 millones según PERUPETRO.



Figura 1.10.: Pozos exploratorios e inversión. 1991 – 2003.
Fuente: PERUPETRO 2003.

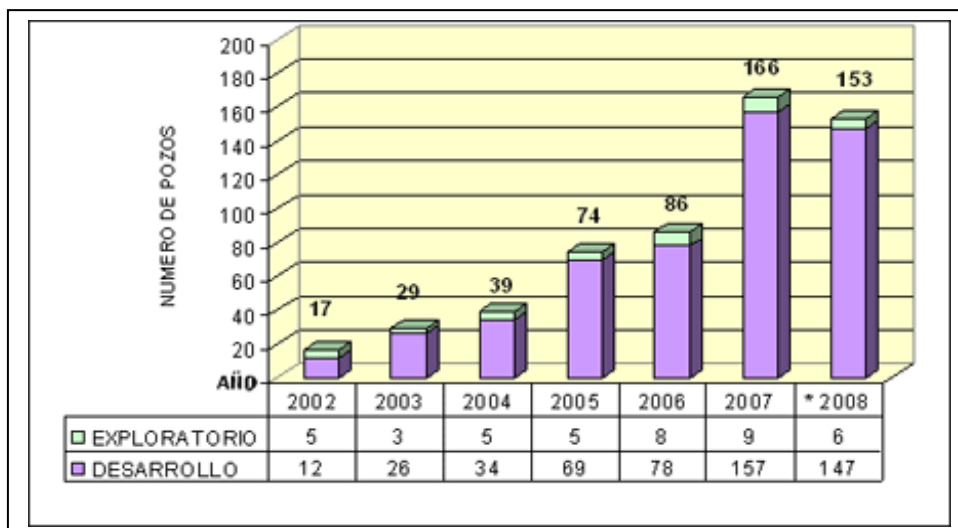


Figura 1.11.: Pozos exploratorios y desarrollo de perforados, 2002 – 2008.
Fuente: PERUPETRO 2008.

1.2.6 EXPLOTACIÓN

Los yacimientos de petróleo se encuentran en las cuencas sedimentarias subterráneas, las cuales suman un total de 16 en el territorio nacional, sin embargo se debe aclarar que no todas cuentan con reservas de hidrocarburos que pueden ser explotados de manera comercial. La Figura 1.12 registra la producción de petróleo del país entre el período comprendido entre 1995 y 2006.

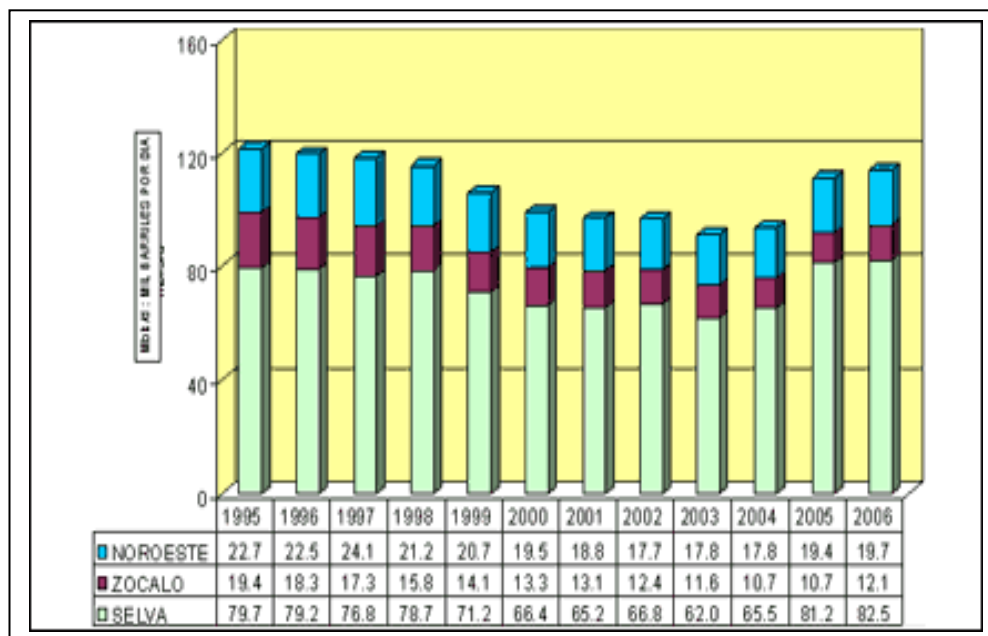


Figura 1.12.: Producción fiscalizada de petróleo total, 1995 –2006.
Zócalo continental – noroeste – selva.
Fuente: PERUPETRO Julio 2006.

Antes de iniciar la etapa de explotación, se debe reconocer la posibilidad de usar los emplazamientos de perforación exploratoria usada para la comprobación del yacimiento, los cuales se ubican en áreas donde se ha encontrado la mayor cantidad de datos, que

permiten conocer las características del yacimiento y las facilidades de uso que brinda las plataformas exploratorias para que se conviertan en pozos productivos.

Antes de iniciar la perforación de los pozos productivos, se analiza la información de la geología del yacimiento, datos sísmicos, ámbito geográfico, características del medio físico, accesibilidad de la zona y los posibles impactos que pueden afectar al ecosistema circundante. Posteriormente se pasa a la etapa de preparación de emplazamiento de los pozos, donde cada uno de ellos dependiendo de su tamaño y magnitud de su operación va a necesitar una serie de instalaciones que pueden incluir a las siguientes: campamentos para el personal, generador eléctrico, instalaciones de operaciones, cimientos de la torre, vertederos de lodos, depósitos de equipos y materiales y otros como un helipuerto según el tamaño de la operación.

Los pozos de producción en la mayoría de los casos usan los pozos de exploración, aunque en la actualidad algunas empresas petroleras están optando por realizar los trabajos de exploración con los llamados pozos de perforación reducida, en respuesta a sus beneficios ecológicos. Constituye una alternativa tecnológica moderna, sin embargo presenta como limitación el no poder utilizar posteriormente sus instalaciones para realizar la explotación productiva comercial.

Durante las perforaciones se producen residuos generados por las labores de perforación, como el lodo residual usado que tiene que ser manejado adecuadamente para evitar impactos negativos al medio ambiente; también cuando se ejecutan las perforaciones es usual extraer testigos de roca de los diferentes extractos para comparar con los datos obtenidos en la etapa de exploración, comprobando la presencia de hidrocarburos explotables comercialmente.

El ascenso del petróleo a la superficie es por el desplazamiento del lodo que entra con una alta presión desplazando al petróleo, lo cual es controlado para evitar explosiones que causan incendios. Por lo anterior, se tiene que la presión ejercida por la densidad del lodo de perforación es mayor que la del petróleo. La presión hidrostática es importante y es mantenida bajo control durante la explotación.

Los líquidos de perforación utilizados son: agua, gel polímero para las perforaciones iniciales, baritina para los trabajos de mayor profundidad, bentonita, bisulfito de amonio, hidróxido de sodio, carbonato de calcio, gilsonita, goma xántica, entre otros elementos secundarios de acuerdo al trabajo efectuado en el pozo.

Para efectuar las perforaciones se toman las medidas de seguridad mediante el control permanente del pozo, evitando que se produzcan explosiones, controlando la presión, densidad del lodo y de los hidrocarburos que deben tener menor presión; también se cuida las propiedades físicas como el peso del lodo para no permitir que ingresen otros líquidos.

De acuerdo a lo descrito en el presente numeral, a continuación la Figura 1.13 registra la distribución de los lotes concesionados a la fecha en la totalidad del territorio peruano.

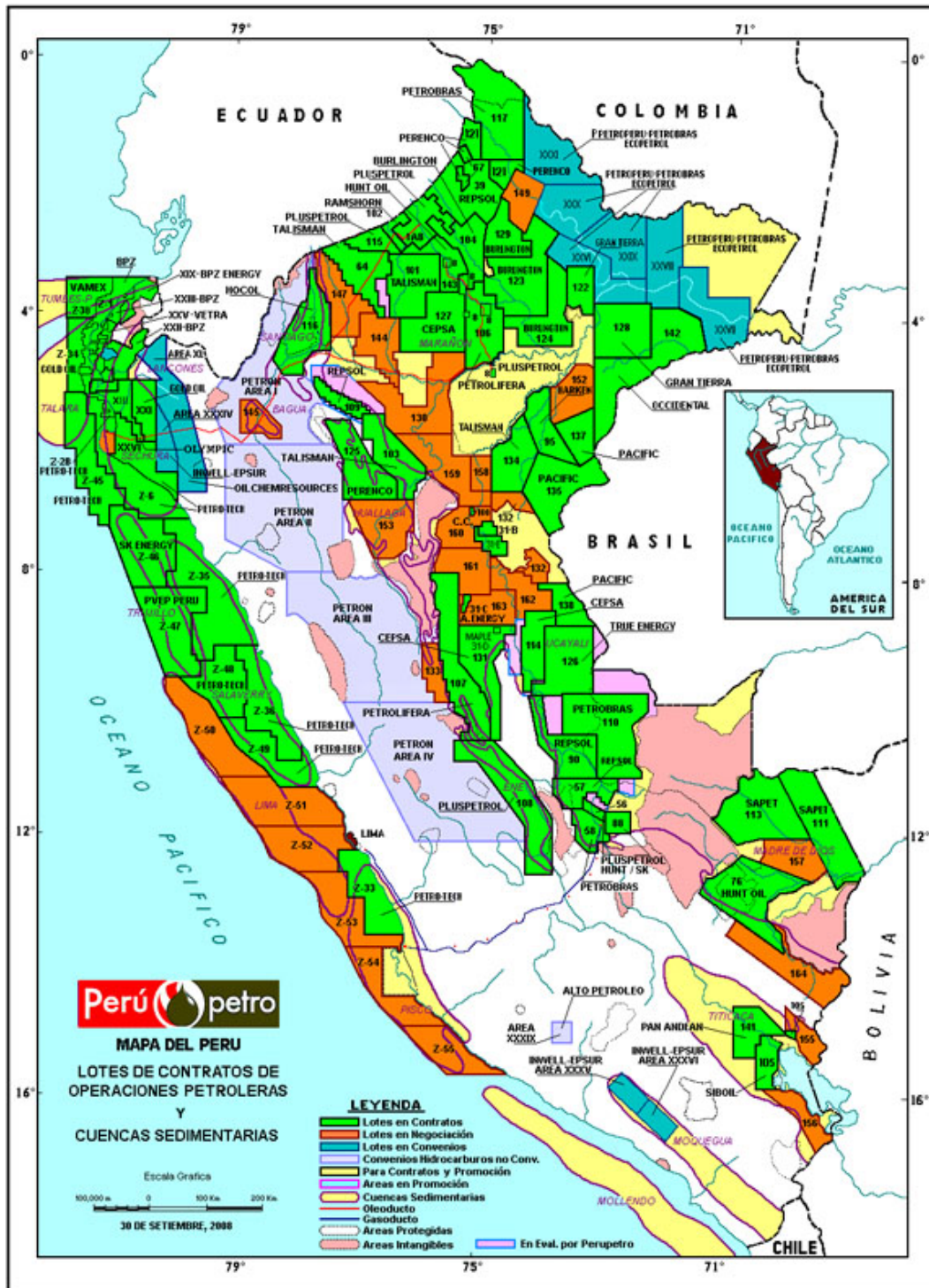


Figura 1.13.: Mapa del Perú- Lotes de contrato de operaciones petroleras y cuencas sedimentarias. Fuente: PERUPETRO Setiembre 2008.

1.2.7 REFINACIÓN Y TRANSPORTE

En el Perú, las refinerías de petróleo convierten el petróleo crudo, a través de una serie de procesos físicos y químicos, en una amplia gama de productos y subproductos comercializables. Los productos de petróleo más comunes son gasolina, petróleo diesel y kerosene. Existen cinco tipos generales de procesos utilizados en la refinación: destilación, desintegración catalítica, desintegración térmica, hidrocalentamiento y reestructuración (reforma).

Las refinerías en Perú también desalinizan el petróleo crudo recibido lavándolo con agua. Todas estas operaciones tienen el potencial para producir aguas residuales. Los procesos específicos en los que se observan generación de aguas residuales son: desalinización, destilación, desintegración, hidrodesulfurización y alquilación.

A nivel nacional, en la actualidad, se encuentran bajo actividad siete refinerías: Refinería La Pampilla S.A., Refinería Talara, Refinería El Milagro, Refinería Pucallpa, Refinería Iquitos, Refinería Conchan y Refinería Shiyiyacu; las cuales se muestran en la Figura 1.14.



Figura 1.14.: Distribución de refinerías en el Perú.

Fuente: Dirección Nacional de Hidrocarburos- Ministerio de Energía y Minas. 2001.

De igual manera, existen veinticuatro plantas de abastecimiento, y su distribución se indica en la Figura 1.15.

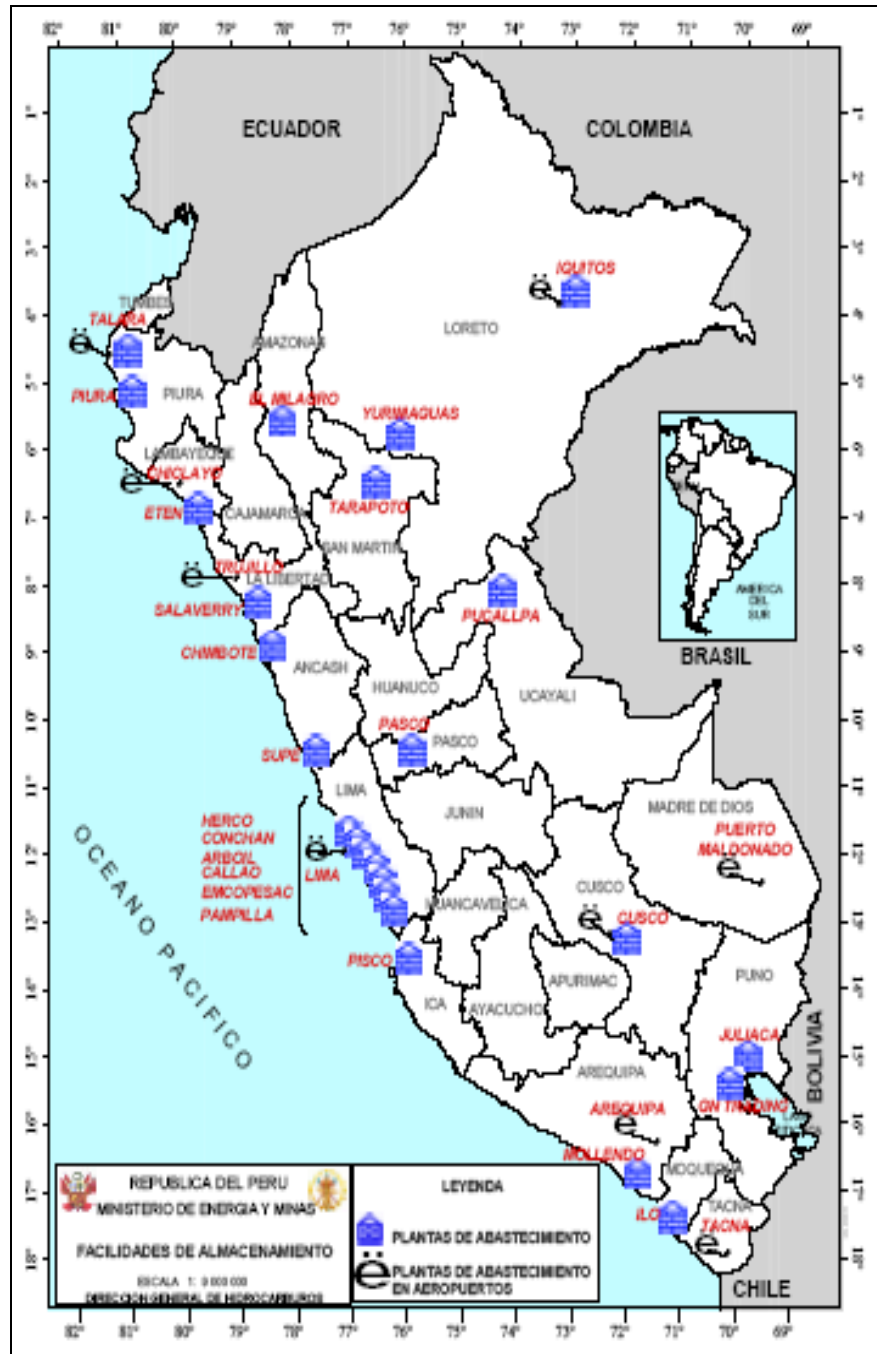


Figura 1.15.: Distribución de plantas de almacenamiento en Perú.

Fuente: Dirección Nacional de Hidrocarburos- Ministerio de Energía y Minas. 2001.

1.3 CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO

1.3.1 CONCEPTOS DE CONTAMINACIÓN (16)

Se conoce como contaminación suelo a la presencia de sustancias que a ciertas concentraciones, afectan negativamente el comportamiento del suelo, conllevando a una degradación del mismo lo que se traduce en la pérdida parcial o total de sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas.

Desde el desarrollo de las diferentes actividades industriales, desde fines del siglo XVIII, se ha hecho necesario distinguir dos tipos de contaminación:

Contaminación natural o endógena: el ejemplo más relevante de este tipo de contaminación es el proceso de concentración y toxicidad que muestran determinados elementos metálicos, los cuales están presentes en los minerales originales de algunas rocas a medida que el suelo evoluciona (meteorización). Un caso significativo se produce sobre rocas serpentizadas con altos contenidos de elementos como cromo, níquel, cobre, manganeso y otros, cuya edafogénesis en suelos con fuertes lavados origina la pérdida de los elementos más móviles como magnesio, calcio y sílice, con lo que los suelos residuales fuertemente evolucionados presentan elevadas concentraciones de aquellos elementos que los hacen susceptibles de ser utilizados como menas metálicas.

Los fenómenos naturales pueden ser causa de importantes contaminaciones en el suelo. De hecho en el caso de un volcán activo hay aportes significativos de sustancias externas y contaminantes, como cenizas, metales pesados e hidrogeniones (H^+) e iones sulfato (SO_4^{-2}).

Contaminación antrópica o exógena: las causas más frecuentes de contaminación son debidas a las actividades antropogénicas, que al ejecutarse sin la necesaria planificación producen un cambio negativo en sus propiedades.

En los estudios de contaminación, no es suficiente detectar la presencia de los contaminantes sino definir los máximos niveles permisibles y además analizar los posibles factores que puedan influir en la respuesta del suelo a dichos contaminantes. Dentro de estos factores se encuentran:

Vulnerabilidad: representa el grado de sensibilidad del suelo frente a la agresión de los contaminantes. Este concepto está relacionado con la capacidad de amortiguación, de tal forma que a mayor capacidad de amortiguación, menor vulnerabilidad. El grado de vulnerabilidad de un suelo frente a la contaminación depende de la intensidad de afectación, del tiempo que debe transcurrir para que los efectos indeseables se manifiesten en las propiedades físicas, químicas y/o biológicas de un suelo y de la velocidad con que se producen los cambios secuenciales en las propiedades de los suelos en respuesta al impacto de los contaminantes.

Este factor permite diferenciar los riesgos potenciales de diferentes actividades o predecir las consecuencias de la continuación en las condiciones actuales.

Poder de amortiguación: el conjunto de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo lo hacen un sistema clave, especialmente importante en los ciclos biogeoquímicos en los que actúa como un reactor complejo, capaz de realizar funciones de filtración, descomposición, neutralización, inactivación, almacenamiento, entre otros. Por lo anterior, el suelo actúa como barrera protectora de otros medios más sensibles, como los hidrológicos y los biológicos. La mayoría de los suelos presenta una elevada capacidad de depuración.

Esta capacidad de depuración tiene un límite diferente para cada situación y para cada suelo. Cuando se alcanza ese límite el suelo deja de ser eficaz e incluso puede funcionar como una fuente de sustancias peligrosas.

El suelo contaminado es aquel que ha superado su capacidad de amortiguación para una o varias sustancias contaminantes, y como consecuencia, pasa de actuar como un sistema protector a ser causa de problemas para el agua, la atmósfera y la biota. Al mismo tiempo se modifica el equilibrio biogeoquímico y aparecen cantidades anómalas de determinados componentes que originan las modificaciones de las propiedades del suelo.

El grado de contaminación de un suelo no puede ser estimado exclusivamente a partir de los valores totales de los contaminantes frente a determinados valores (máximos valores permisibles), sino que se hace necesario considerar:

Biodisponibilidad: se entiende como la asimilación del contaminante por los organismos, y en consecuencia la posibilidad de causar algún efecto, negativo o positivo.

Movilidad: regula la distribución del contaminante y por lo tanto su posible transporte a otros sistemas.

Persistencia: regula el período de actividad de las sustancias contaminantes (peligrosidad).

Carga crítica: representa la cantidad máxima de un determinado componente que puede ser aportado a un suelo sin que se produzcan efectos nocivos en el suelo (ejemplo: lluvia ácida).

1.3.2 EFECTO CONTAMINANTE DE LA INDUSTRIA PETROLERA EN EL SUELO

Los impactos ambientales que pueden producirse en los trabajos de exploración, explotación y transporte de hidrocarburos de petróleo varían de acuerdo al tamaño de operación y las condiciones del medio receptor (17).

En la actividad petrolera el suelo es afectado en dos niveles:

De forma directa en los lugares en donde se ubican los emplazamientos de las plataformas petroleras, depósitos y campamentos de trabajadores; el riesgo de deslizamiento existe en respuesta a las operaciones de corte y relleno para nivelar el terreno y el desbroce de la cobertura vegetal dejando descubierto el suelo a las inclemencias del clima, provocando la erosión y enlodamiento del suelo.

En la construcción de los emplazamientos de los pozos de explotación se usa grava o arena según sea el caso, estos materiales sedimentarios provienen de los lechos de los ríos, causando modificaciones o efectos indirectos sobre el cause de los mismos.

En los suelos donde se encuentran los emplazamientos de los pozos se debe tener en cuenta sus características, su susceptibilidad, permeabilidad, pH y alcalinidad a fin de minimizar el impacto, manteniendo patrones de drenaje e infiltración, previniendo la saturación de los suelos y la pérdida de la capa superficial (18).

Por el manejo de los combustibles y productos químicos utilizados en las diferentes actividades de la industria petrolera. El impacto negativo de estos productos sobre el suelo dependen del tipo de contaminante (densidad, viscosidad y tensión de interfase), del

volumen derramado, de la permeabilidad del suelo (alteración de horizontes profundos), de la profundidad de la napa freática y de la dirección del flujo de los acuíferos subterráneos.

1.3.3 COMPORTAMIENTO DE LOS HIDROCARBUROS EN EL SUELO (19)

En el suelo los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, iniciando una serie de procesos físico químicos simultáneos como evaporación y penetración, que dependiendo del tipo de hidrocarburo, temperatura, humedad, textura del suelo y cantidad vertida puede ser más o menos lentos, ocasionando una mayor toxicidad, además de tener una moderada, alta o extrema salinidad, dificultando su tratamiento (20).

Las características del suelo y las propiedades de los productos derivados de petróleo son factores que deben tenerse en cuenta a fin de determinar la persistencia y migración de estos contaminantes en este sustrato. Dentro de las propiedades de los fluidos hidrocarbonados se deben considerar principalmente la densidad, la viscosidad y la tensión interfacial, y en menor grado la presión capilar, humedad, la saturación y la saturación residual, mientras que aquellas referentes al suelo incluyen la porosidad y la permeabilidad. De igual forma, es importante tener en cuenta condiciones físicas específicas del sitio del derrame de los contaminantes como la presencia y profundidad de la napa freática, el volumen derramado y la dirección del flujo subterráneo, que contribuyen a la migración y dispersión de éstos.

El petróleo crudo mediante diversos procesos puede ser refinado en varios productos descritos en el numeral 1.2.7. Estos productos refinados, al igual que el petróleo crudo, están constituidos por una mezcla de compuestos hidrocarbonados, los cuales se clasifican de la siguiente manera teniendo en cuenta su composición y sus propiedades físicas:

Gasolinas: son mezclas de productos hidrocarbonados y aditivos químicos como alcoholes (etanol) y éteres (MTBE: metil tert-butil éter). Las gasolinas presentan una mayor movilidad a través del suelo que los otros dos grupos que se describirán posteriormente. Esta alta movilidad se debe principalmente a que sus componentes poseen un bajo peso molecular (moléculas constituidas de cuatro a diez átomos de carbono). El bajo peso molecular conlleva a una baja viscosidad, una alta volatilidad y una solubilidad moderada en agua. Para el caso de derrames nuevos con gasolinas, se puede determinar la presencia de un alto porcentaje de hidrocarburos aromáticos convirtiéndose en productos de mayor solubilidad y toxicidad (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno - BTEX). Debido a que los BTEX poseen una alta volatilidad, solubilidad y biodegradabilidad, son los primeros eliminados de la mezcla de la pluma. Contrariamente, para el caso de derrames antiguos con gasolinas, se puede detectar una baja concentración de BTEX, transformándose en productos más pesados, de menor solubilidad y degradabilidad. En consecuencia, el producto se torna viscoso, relativamente denso, menos volátil, y menos móvil que en caso de derrames recientes de gasolinas.

Medianamente destilados: dentro de esta categoría se encuentra el diesel, el kerosene, y el combustible para aviones, entre otros. Estos productos pueden llegar a contener hasta 500 compuestos individuales, haciéndolos más densos, y por ende menos volátiles, menos solubles en agua y menos móviles que las gasolinas. Los principales constituyentes de esta categoría incluyen a hidrocarburos compuestos de 9 a 20 átomos de carbono. Compuestos

aromáticos como los BTEX se encuentran en concentraciones traza, de tal forma que en derrames antiguos no se encuentran presentes.

Aceites pesados: a esta categoría pertenecen los aceites pesados y los lubricantes, cuya composición y propiedades son muy similares a las expuestas por los compuestos medianamente destilados. Son relativamente viscosos e insolubles en agua y presentan poca movilidad en el suelo. La mayoría de los compuestos que se encuentran en esta categoría están constituidos por más de 14 átomos de carbono.

Los productos hidrocarbonados derivados del petróleo pueden encontrarse en cuatro fases cuando afectan al suelo: vapor, residual (asociada a las partículas del suelo), acuosa (disuelta en el agua) y libre (hidrocarburos líquidos). La distribución de estas fases está determinada por procesos de disolución, volatilización y sorción.

Efectivamente, cuando se lleva a cabo un derrame sobre el suelo de estos productos derivados del petróleo, los hidrocarburos líquidos tienden a descender por acción de la gravedad y las fuerzas capilares. El efecto de la gravedad es mayor para el caso de líquidos de alta densidad. De continuar el derrame, la capa superficial del suelo comienza a saturarse y los hidrocarburos migran hacia las capas inferiores del suelo dejando un nivel residual de hidrocarburos inmóviles sobre la superficie del suelo y a lo largo del trayecto migratorio del contaminante.

Para el caso en donde el volumen del derrame sea relativamente pequeño con respecto a la capacidad de retención del suelo, los hidrocarburos tenderán a ser adsorbidos por las partículas de suelo y en consecuencia la totalidad de la masa será inmovilizada.

Para los hidrocarburos de petróleo que tienden a acumularse como producto libre sobre los cuerpos de agua, el volumen del derrame debe ser suficiente para superar la capacidad de retención del suelo, estableciendo de esta forma un sistema de recolección del producto contaminante.

Independientemente del caso que se presente, se hace necesario implementar las acciones apropiadas de remediación con el objetivo de mitigar la fase residual (adsorbida) de tal forma que se impide que actúe como una fuente contaminante soluble o volátil del agua subterránea, y potencialmente explosivo por la presencia de vapores. Fracciones de las fases residual y libre de los contaminantes hidrocarbonados tienden a volatilizarse (evaporación) y solubilizarse (disolución); estos procesos de solubilización y volatilización conllevan a que el contaminante se torne más denso y en consecuencia menos móvil. Los hidrocarburos que se encuentran en fase gaseosa presentan una mayor movilidad, migrando a través de largas distancias por medio de fracturas, capas de arena y líneas de conducción entre otras. La acumulación de estos vapores en estructuras herméticas representa un riesgo potencial de incendios y explosiones.

Sin embargo, se hace necesario resaltar que la extensión y la velocidad de migración también dependen parcialmente de las propiedades del suelo. Dentro del contexto referido al flujo del fluido, el medio geológico puede ser clasificado con base en sus características dominantes del tamaño del poro, fracturas y canales a través de los cuales el fluido puede migrar.

Las dos propiedades más importantes del medio geológico a considerar son:

Porosidad: hace referencia a la habilidad del medio por retener los fluidos. Constituye una característica importante en la evaluación del sistema de recolección del producto libre. Dentro de esta habilidad hay una clasificación: porosidad primaria, la cual se forma cuando hay un depósito de sedimentos y depende de la forma, el tipo y la agrupación de los granos; y porosidad secundaria, la cual se desarrolla después de la formación de las rocas o del depósito de sedimentos (fracturas). La porosidad total está basada en el volumen total de vacíos (primario y secundario) ya sea que los poros estén o no conectados.

Permeabilidad: hace referencia a la habilidad del medio por transportar los fluidos. La permeabilidad intrínseca de un medio geológico es independiente del flujo del fluido a través del medio, está relacionada con la conductividad hidráulica.

1.4 LEGISLACIÓN APLICADA VIGENTE

1.4.1 LEGISLACIÓN INTERNACIONAL (21)

El suelo representa un recurso no renovable sujeto, en muchos casos, a derechos de propiedad. La preocupación por su degradación y conservación por parte de organismos internacionales se remonta a unos 30 años atrás.

En el ámbito de la Unión Europea, la degradación del suelo, entendida como la pérdida de capacidad de realizar sus propias funciones, tiene actualmente las siguientes causas principales: la erosión, la pérdida de materia orgánica, la contaminación, el sellado, la compactación, la reducción de la biodiversidad, la salinización y las catástrofes naturales como inundaciones y deslizamientos de tierras.

Dado que muchas de estas causas se dan simultáneamente en numerosos suelos, la consecución de una política en pro de la sostenibilidad del suelo exige la adopción de una estrategia integrada para su protección. En particular, la incorporación al suelo de agentes contaminantes por encima de su capacidad de amortiguación supone la contaminación del mismo y la posible contaminación de las aguas subterráneas, lo cual puede dar lugar a una limitación de algunas de sus funciones. La presencia en el suelo de elementos tóxicos para la salud humana y/o los ecosistemas supone un riesgo que, de ser inaceptable, exige la implantación de medidas correctoras acordes con las características del caso.

Dada la importancia por mantener el equilibrio y una adecuada calidad ambiental, en las últimas cuatro décadas se han llevado a cabo una serie de acuerdos internacionales que buscan la forma de promover la protección y recuperación del suelo. Entre ellos cabe destacar:

La Carta Europea de los Suelos, aprobada por el Consejo de Europa en 1972, y la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Primera Conferencia del PNUMA, Estocolmo 1972) empiezan a poner de manifiesto la preocupación por la degradación y contaminación del suelo como consecuencia del desarrollo humano.

La Carta Mundial de los Suelos, adoptada por la FAO, en Roma 1981 y la Política Mundial del Suelo (PNUMA 1982) persiguen el fomento de la cooperación internacional

para el uso racional del recurso suelo y reflejan la preocupación por su degradación. En ellas se establecen los principios de actuación para la explotación de los suelos en forma sostenible y las directrices para la formulación de políticas nacionales.

En el marco de la Cumbre de Río de Janeiro de 1992 se desarrolló el Convenio sobre la Diversidad Biológica, estableciendo un compromiso de conservación de la diversidad biológica y de la utilización sostenible de sus componentes (entre los cuales se encuentra el suelo) y de los recursos genéticos.

La importancia de los ecosistemas terrestres queda recogida en la Convención Marco sobre el Cambio Climático de 1992, en la que se reconoce su papel como sumideros de gases de efecto invernadero, y se señala que la degradación del suelo y sus cambios de uso inciden negativamente en el aumento global de las emisiones de dichos gases. En esta misma línea, el Protocolo de Kyoto (1997) promueve el desarrollo sostenible e invita a todas las partes a aplicar políticas y medidas de protección y aumento de los sumideros de gases de efecto invernadero.

En lo referente a la problemática específica de la erosión de los suelos y a la pérdida de suelo agrícola a nivel mundial, la Convención de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (1994) marcó como objetivo prevenir y reducir la degradación del suelo, rehabilitar las zonas que están parcialmente degradadas y recuperar las que se hayan desertificado.

La conciencia de la comunidad internacional respecto a la necesidad de proteger el suelo es cada vez más evidente, como lo ponen de manifiesto las recientes iniciativas y compromisos políticos y legales para la protección de los recursos y del medio ambiente (Nairobi 1997, Malmö 2000, Johannesburgo 2002).

Si bien en el ámbito de la Unión Europea no existe aún una legislación específica para la protección del suelo, se hace necesario resaltar que el Sexto Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente (Decisión 1600/2002/CEE) incluye una estrategia temática para la protección del suelo, haciendo hincapié en la prevención de la contaminación, la erosión, la desertización, la degradación del suelo, la ocupación de terrenos y los riesgos hidrogeológicos.

La Comunicación de la Comisión Europea COM (2002) 179, “Hacia una estrategia temática para la protección del suelo”, es la primera que aborda de forma específica la protección del suelo, enfatizando en temas como la erosión, la pérdida de materia orgánica y la prevención de la contaminación. Con el fin de garantizar la adecuada protección del suelo, la Comisión de la Unión Europea propuso una serie de medidas dirigidas a evitar la contaminación del suelo, procurando integrar la protección del suelo en sus principales políticas. De igual manera, se propuso llevar a cabo los preparativos para desarrollar una propuesta legislativa sobre la vigilancia del suelo.

La Red Europea de Información y Observación del Medio Ambiente (EIONET) ha sido concebida por la Agencia Europea de Medio Ambiente con el fin de crear un sistema permanente de información y observación ambiental e integra en su seno a los denominados Centros Nacionales de Referencia (CNR), cuya función principal se centra en asistir a la Agencia Europea de Medio Ambiente en la generación de información útil para la toma de decisiones, a partir de la información básica existente relativa al suelo. En el

marco EIONET se han creado cinco grupos de trabajo para desarrollar la política de protección del suelo: erosión, contaminación, pérdida de materia orgánica, sistema de vigilancia de suelos e investigación.

En términos generales, desde 1972, con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, en los países latinoamericanos se ha evidenciado una serie de modificaciones en los sistemas jurídicos que consisten en la creación de normas con el claro propósito de proteger el medio ambiente y promover el desarrollo sostenible. A este tipo de normas se les conoce bajo el concepto de “derecho ambiental”. Los principales cambios registrados se centran en:

La prescripción constitucional de que el Estado y la Sociedad Civil deben proteger el Medio Ambiente, lo cual sugiere que la constitución por si misma promueve un modelo de desarrollo sostenible.

La protección de ciertos componentes específicos del Medio Ambiente, como la diversidad biológica (flora y fauna), el patrimonio genético, ciertas zonas geográficas y el establecimiento de áreas naturales protegidas.

La protección del patrimonio cultural.

La responsabilidad por el daño ambiental, de tal forma que las conductas y actividades consideradas lesivas al medio ambiente sujetan a los infractores, personas naturales o jurídicas, a sanciones penales y administrativas, independientemente de la obligación de reparar el daño causado.

1.4.2 LEGISLACIÓN NACIONAL GENERAL (22)

Constitución Política del Perú: promulgada el 29 de diciembre de 1993 y rectificada en el referéndum del 31 de diciembre de 1993. En su punto 1.1., Protección Ambiental.

- ✓ Título I, De La Persona y De La Sociedad, capítulo I, Derechos Fundamentales De La Persona.
 - Artículo 2º, Derechos a la paz, al descanso y a un medio ambiente equilibrado, punto 22, donde dice: toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.
- ✓ Título III, Del Régimen Económico, capítulo II, Del Ambiente y Los Recursos Naturales.
 - Artículo 66º, Recursos Naturales, donde dice: los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento.
Por Ley Orgánica se fijan las condiciones de su utilización y de su otorgamiento particular. La concesión otorga a su titular un derecho real, sujeto a dicha norma.

- Artículo 67°, Política Nacional Ambiental, donde dice: el Estado determina la política nacional del ambiente. Promueve el uso sostenible de sus recursos naturales.
- Artículo 68°, Protección de la Diversidad Biológica y de las Áreas Naturales Protegidas, donde dice: el Estado está obligado a promover la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas.

Constitución Política del Perú en su punto 2.4. Ley Orgánica para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales: Ley No. 26 821 promulgada el 26 de junio de 1997.

✓ Título I, Disposiciones Generales

- Artículo 1°, Ámbito de aplicación, donde dice: La presente ley orgánica norma el régimen de aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, en tanto constituyen patrimonio de la Nación, estableciendo sus condiciones y las modalidades de otorgamiento a particulares en cumplimiento del mandato contenido en los Artículos 66° y 67° del capítulo II del Título III de la Constitución Política del Perú y en concordancia con lo establecido en el Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales y los convenios internacionales ratificados por el Perú.
- Artículo 2°, Objetivo, en donde dice: La presente Ley Orgánica tiene como objetivo promover y regular el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, renovables y no renovables, estableciendo un marco adecuado para el fomento de la inversión, procurando un equilibrio dinámico entre el crecimiento económico, la conservación de los recursos naturales y del ambiente y el desarrollo integral a la persona humana.
- Artículo 3°, Definición de Recursos Naturales, donde dice: Se consideran recursos naturales a todo componente de la naturaleza, susceptible de ser aprovechado por el ser humano para la satisfacción de sus necesidades y que tenga un valor actual o potencial en el mercado, tales como:
 - Las aguas superficiales y subterráneas;
 - El suelo, el subsuelo y las tierras por su capacidad de uso mayor: agrícolas, pecuarias, forestales y de protección; (...)
 - Los recursos hidrocarburíferos, hidroenergéticos, eólicos, solares, geotérmicos y similares; (...)
 - El paisaje natural, en tanto sea objeto de aprovechamiento económico, es considerado recurso natural para efectos de la presente ley.

✓ Título V, De las condiciones de aprovechamiento sostenible de los recursos naturales:

- Artículo 28°, Aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, donde dice: Los recursos naturales deben aprovecharse en forma sostenible. El aprovechamiento sostenible implica el manejo racional de los recursos naturales teniendo en cuenta su capacidad de renovación, evitando su sobreexplotación y reponiéndolos cualitativa y cuantitativamente, de ser el caso.

El aprovechamiento sostenible de los recursos no renovables, consiste en la explotación eficiente de los mismos, bajo el principio de sustitución de

valores o beneficios reales, evitando o mitigando el impacto negativo sobre otros recursos del entorno y del ambiente.

Constitución Política del Perú en su punto 2.5. Ley sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica: Ley No. 26839 promulgada el 16 de julio de 1997.

✓ Título I: Disposiciones generales

- Artículo 1º, Regulación de la conservación de la diversidad biológica, donde dice: La presente ley norma la conservación de la diversidad biológica y la utilización sostenible de sus componentes en concordancia con los Artículos 66º y 68º de la Constitución Política del Perú. Los principios y definiciones del Convenio Diversidad Biológica rigen para los efectos de aplicación de la presente ley.
- Artículo 3º, Implicancias que acarrea la conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica, donde dice: En el marco del desarrollo sostenible, la conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica implica: Conservar la diversidad de ecosistemas, especies y genes, así como mantener los procesos ecológicos esenciales de los que dependen la supervivencia de las especies. (...)
- Artículo 5º, Medidas que promueve el Estado conforme a lo establecido por el Artículo 68º de la constitución, en donde dice: En el cumplimiento de la obligación contenida en el Artículo 68º de la Constitución Política del Perú, el Estado promueve: (...)
 - La conservación de los ecosistemas naturales así como las tierras de cultivo, promoviendo el uso de técnicas adecuadas de manejo sostenible.
 - La prevención de la contaminación y de gradación de los ecosistemas terrestres y acuáticos, mediante prácticas de conservación y manejo.
 - La rehabilitación y restauración de los ecosistemas degradados.
 - La generación de condiciones, incluyendo los mecanismos financieros, y disposición de los recursos necesarios para una adecuada gestión de la diversidad biológica.
 - La adopción de tecnologías limpias que permitan mejorar la productividad de los ecosistemas, así como el manejo integral de los recursos naturales. (...)

Dentro de la promulgación de leyes “generales” o leyes ‘marco’ que han influido en el desarrollo de la legislación ambiental mediante la generación de reglamentación y de normas técnicas, se encuentra el Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (1990). El Código cuenta con un Título preliminar y 22 capítulos que regulan, en ese orden, las siguientes materias: política ambiental; planificación ambiental; protección del ambiente, medidas de seguridad; evaluación, vigilancia y control; ciencia y tecnología; acción educativa; medios de comunicación y participación ciudadana; patrimonio natural; diversidad genética y ecosistemas; áreas naturales protegidas; patrimonio natural cultural; recursos mineros; recursos energéticos; población y ambiente; prevención de los desastres naturales; infraestructura económica y de servicios; salubridad pública; limpieza pública;

agua y alcantarillado; sanciones administrativas; delitos y penas; y sistema nacional del ambiente. La parte final del Código contiene un conjunto de disposiciones especiales, finales y transitorias.

El Código define la política ambiental como aquélla que tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, para garantizar una adecuada calidad de vida y, en consecuencia, hacer posible el desarrollo integral de la persona.

En materia de protección de suelos y tierras, entendiéndose por tales los espacios destinados a usos agrícolas y no agrícolas, respectivamente, hay que señalar que estos recursos rara vez cuentan en los países de América Latina con ordenamientos jurídicos especiales. Las disposiciones sobre su protección están, por lo general, dispersas en ordenamientos jurídicos que tratan de materias disímiles, como las concernientes a las actividades agrícolas, pecuarias y silvícolas.

A pesar del Código y de una serie de normas que se reconocieron posteriormente, los principios expuestos constituyen los lineamientos de una política ambiental de carácter sectorial, los cuales no han sido estructurados en un cuerpo normativo integrado de carácter general y obligatorio. Lo anterior indica que se carece de una Política Ambiental Nacional capaz de establecer prioridades, y pautas de actuación homogéneas y claras para el conjunto de autoridades que cumplen funciones ambientales.

La carencia de una Política Ambiental Nacional sumada a la fuerte sectorialización administrativa de la gestión ambiental peruana, y a la gran heterogeneidad del territorio nacional, conlleva a una serie de problemas asociados a la actuación de las autoridades que ejercen competencias ambientales ya que se generan vacíos, contradicciones y yuxtaposiciones en la toma de decisiones (elaboración de normas legales).

El Consejo Nacional del Ambiente (CONAM), autoridad ambiental nacional con funciones coordinadoras, creada en el mes de diciembre de 1994, tiene a su cargo la elaboración de la Política Ambiental Nacional, la cual una vez aprobada por decreto Supremo de la Presidencia del Consejo de Ministros, será de obligatorio cumplimiento por todas las autoridades ambientales del país.

Desde 1993, se han venido aprobando diversas normas sectoriales que establecen mandatos integrales de protección ambiental tanto para las actividades que recién van a desarrollarse, como para las que se han venido ejecutando desde tiempos anteriores a la aprobación de las nuevas normas ambientales. Estos dispositivos legales giran en torno a los reglamentos de protección ambiental de las actividades productivas, las cuales a su vez, tienen como instrumento medular a la Evaluación de Impacto Ambiental. En forma complementaria estas normas se apoyan en parámetros de contaminación ambiental tanto de fuente emisora, como de medio receptor y en criterios de prevención en la gestión, los cuales sin embargo, no son homogéneos, ni tienen el mismo énfasis dentro de cada marco sectorial.

Así mismo, dentro de estas reglamentaciones sectoriales se han aprobado normas que regulan la audiencia pública en la fase de revisión y aprobación del Estudio de Impacto Ambiental y otras que establecen medidas de control frente a las empresas de consultoría y auditoría ambiental, dedicadas las primeras a la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental y, las segundas a la supervisión de su cumplimiento. También se han

establecido mecanismos de monitoreo continuos y medios de entrega de información a la autoridad competente.

Adicionalmente, el CONAM dirigió el proceso mediante el cual se “Aprueban cronograma de priorizaciones para la aprobación progresiva de los Estándares de Calidad Ambiental y Límites Máximos Permisibles” correspondiente al Decreto del Consejo Directivo 029-2006-CONAM/CD. Derivado de lo anterior se aprobó en diciembre de 2007 el Decreto Supremo No. 199-2007-CONAM/PCD mediante el cual se proponen los Estándares Nacionales de calidad ambiental para el suelo.

La última medida del Estado peruano para consolidar su compromiso frente a la preservación del medio ambiente se centra en la creación del Ministerio del Medio Ambiente, creación que fue promulgada en el mes de mayo de 2008. Este organismo tiene como finalidad actuar como un ente evaluador, fiscalizador y de defensa del uso sostenible de los recursos naturales limitando la degradación del medio ambiente proveyendo una mejor calidad de vida para las futuras generaciones.

1.4.3 LEGISLACIÓN NACIONAL SUBSECTOR HIDROCARBUROS (15)

Ley 26221: Ley Orgánica que norma las actividades de hidrocarburos en el territorio nacional.

- Artículo 87°, Protección del Medio Ambiente, donde dice: Las personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, que desarrollen actividades de hidrocarburos deberán cumplir con las disposiciones sobre el medio Ambiente. (...)

Decreto Supremo No. 046-93-EM, Reglamento para la protección ambiental en las actividades de hidrocarburos.

✓ Título I: Del contenido y alcance

- Artículo 1°, donde dice: El presente reglamento tiene por objeto establecer las normas y disposiciones a nivel nacional para el desarrollo de las actividades de exploración, transformación, transporte, comercialización, almacenamiento y conexas en el aprovechamiento de los recursos hidrocarburíferos en condiciones que éstas no originen un impacto ambiental y/o social negativo para las poblaciones y ecosistemas que sobrepase los límites que se establezcan en el presente Reglamento, de conformidad con lo establecido en el Decreto Legislativo No. 613 Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, Decreto legislativo 757, la Ley Orgánica de Hidrocarburos, Ley No. 26221 y demás disposiciones legales pertinentes; bajo el concepto de desarrollo sostenible.
- Artículo 3, donde dice: Las personas naturales y jurídicas a que hace mención el artículo 2, son responsables por las emisiones, vertimientos y disposiciones de desechos al ambiente que se produzcan como resultado de los procesos efectuados en sus Instalaciones. (...) esta Dirección con carácter prioritario definirá los estándares de emisión permitidos para cada instalación involucrada.

El concepto constitucional “tierras” en el régimen agrario, comprende a todo predio susceptible de tener uso agrario, entre otras, están comprendidas las tierra de uso agrícola, de pastoreo, las tierra de recursos forestales y de fauna, las tierras de protección, así como, las riberas y márgenes del álveos y cauces de ríos, y en general, cualquier otra denominación legal que reciba el suelo del territorio peruano. El régimen jurídico de las tierras agrícolas se rige por el Código Civil y de la ley 26505 aprobada en julio de 1995. La utilización de tierras para el ejercicio de actividades mineras o de hidrocarburos requiere acuerdo previo con el propietario o la culminación del procedimiento de servidumbre que se precisa en el Reglamento de dicha ley. De hecho, el Artículo No. 7 indica “mantiene vigencia el uso minero o de hidrocarburos sobre tierras eriazas cuyo dominio corresponde al Estado y que a la fecha están ocupadas por infraestructura, instalaciones y servicios para fines mineros y de hidrocarburos” (modificación de texto sustituido por la Ley 26570, publicada el 04 de enero de 1996 mediante D.S. No. 017-1996-AG).

La normatividad ambiental del sector energía y minas, cuenta con 03 instrumentos principales de gestión ambiental:

- ✓ **Estudios de Impacto Ambiental (EIA)**, relacionado con proyectos nuevos.
- ✓ **Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA)**, relacionados con operaciones que venían operando con anterioridad a la publicación de los reglamentos ambientales. Este programa describe las acciones e inversiones necesarias para el cumplimiento del Reglamento para la Protección Ambiental en las actividades de hidrocarburos. Para el año 1995, hubo 43 empresas en el sector hidrocarburos que asumieron el compromiso del PAMA, el cual se extendió hasta el 2002. Para esta oportunidad se estimó una inversión de 82 millones de dólares americanos, registrándose a junio de 2002 un avance del 120% traducido en una inversión de 99 millones de dólares americanos. A continuación, la Figura 1.16 registra para el año 2001, los lotes bajo contrato de exploración y explotación con control ambiental al noroeste del Perú.
- ✓ **Auditoría Ambiental**, orientada a ejercer un adecuado control y fiscalización en el cumplimiento de los compromisos ambientales asumidos por las empresas con el Estado.

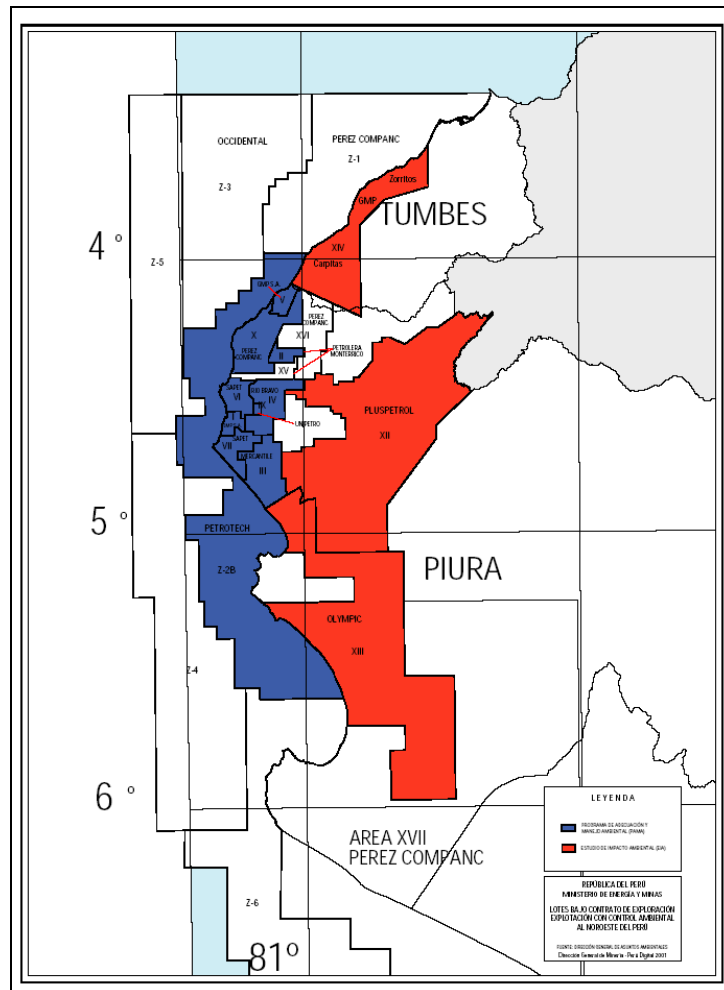


Figura 1.16.: Lotes bajo contrato de exploración, explotación con control ambiental al noroeste del Perú.
Fuente: Dirección General de Asuntos Ambientales. 2001.

CAPÍTULO 2: REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

2.1 CONCEPTOS DE REMEDIACIÓN

La industria petrolera en el Perú posee un significado estratégico de primer orden, que se manifiesta por los niveles de contribución a la economía nacional. La necesidad de satisfacer, cada día, una mayor demanda de los recursos energéticos ha ocasionado el crecimiento de esta industria, y con ello el impacto sobre los recursos naturales y el ecosistema, principalmente.

En respuesta a lo anterior se ha evidenciado un marcado deterioro ambiental conllevando a la introducción del término de contaminación dentro de la legislación peruana, la cual está definida como la acción que resulta de la introducción de contaminantes al ambiente, referida por el D.S. 046-93-EM promulgado el 10 de noviembre de 1993 en el Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos (23) y derogado por el D.S. 015-06-EM. De igual manera, como se ha podido demostrar en los numerales 1.4.1, 1.4.2 y 1.4.3 la promulgación de diversas leyes representa el mecanismo mediante el cual se busca proteger los diferentes elementos que conforman el medio ambiente (agua, aire, suelo y biota). Se hace necesario determinar como la legislación peruana contempla la restauración y/o remediación de los impactos ambientales causados por este sector.

De acuerdo al D.S. 102-2001-PCM promulgado el 04 de septiembre de 2001, la restauración, entendida dentro de un concepto de diversidad biológica, define la acción por medio de la cual se busca retornar a su estado original un ecosistema o una población degradada. Por su parte el diccionario de la Lengua Española (1992) define restaurar como reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía. Desafortunadamente,

faltó profundizar aún más en la definición de la restauración, ya que dentro del marco legal no se considera como una actividad de saneamiento o limpieza (17).

El término *remediación* no está registrado en los diccionarios de la Lengua Española, razón por la cual posiblemente éste no haya sido incluido dentro de la misma legislación. Como se sabe el término “remediación” es una traducción de la palabra “*remediation*” que en países como Estados Unidos, Canadá y otros de lengua inglesa se refiere a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados (17).

Un término que sí aparece en el diccionario es el verbo “remediar”, cuya definición es poner remedio al daño; corregir o enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; librar, apartar o separar de un riesgo; evitar que suceda algo que pueda derivarse algún daño o molestia. Dentro de la problemática ambiental, esta última definición es la que se busca una vez se haya detectado alguna alteración del medio ambiente por acción de un producto contaminante (17).

Los suelos contaminados con hidrocarburos se consideran materiales peligrosos. Es importante tener en cuenta varias variables a fin de evaluar la mejor alternativa que permita su tratamiento (24, 25).

2.2 TIPOS DE REMEDIACIÓN

En el ámbito ambiental, existen diversas tecnologías que se han desarrollado para llevar a cabo la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua. La opción tecnológica más adecuada deberá considerar algunos criterios técnicos para cada caso en particular (17). Las técnicas de tratamiento de residuos sólidos consisten en la aplicación de procesos químicos, biológicos o físicos a desechos peligrosos o materiales contaminados a fin de cambiar su estado en forma permanente. Estas técnicas destruyen contaminantes o los modifican a fin de que dejen de ser peligrosos, además pueden reducir la cantidad de material contaminado presente en un lugar, retirar el componente de los desechos que los hace peligrosos o inmovilizar el contaminante en los desechos. Entre las técnicas con menor impacto ambiental cabe destacar aquellas que no requieren excavación y transporte de suelo. La técnica a utilizar depende entre otros muchos factores de: tipo de contaminante, tipo de terreno, afectación de las aguas subterráneas, tiempo necesario para descontaminar, y costos (26).

No todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo cual se hace necesario realizar estudios de factibilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con la efectividad, la aplicación a gran escala en campo, la estrategia de operación, así como el tiempo y costo de la operación. De las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar (17):

2.2.1 BIORREMEDIACIÓN

Actualmente se considera a la biorremediación como uno de los medios más apropiados para la restauración de muchos sitios contaminados (27).

Es una técnica innovadora que se ha desarrollado en los años 80, y ha sido aplicada exitosamente en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos (26). Efectivamente numerosas investigaciones han demostrado que los métodos biológicos son eficientes y adecuados para el tratamiento de este tipo de material debido a que causan menor impacto en el sitio del problema (28).

Constituye una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos, ya que en su mayoría éstos son biodegradables. Los contaminantes son transformados en compuestos químicamente más simples (25). Uno de los retos de las tecnologías de la biorremediación es acelerar la actividad microbiana para reducir los tiempos de biodegradación de contaminantes en suelo y agua (17, 29). De igual manera, la EPA (*Environmental Protection Agency* de los Estados Unidos de América) considera a la biorremediación como un método innovador de limpieza de contaminantes presentes en el ecosistema, basado en procesos biológicos por medio de los cuales se destruye o se transforman los productos contaminantes (24).

El éxito de la biorremediación obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos involucrados. La opción más segura es la de aprovechar la flora autóctona y estimular su actividad mediante la adición de nutrientes (17). Dentro de la definición establecida por la EPA, la biorremediación puede ser intrínseca (natural) o activada (bioingeniería) mediante la adición de nutrientes, aceptores o donadores de electrones, o de microorganismos al sistema a remediar (30). A pesar que la biorremediación toma tiempo, tiene la ventaja de que el suelo tratado puede recuperar su actividad biológica natural.

Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos, la biorremediación es de las mejores desde los puntos de vista ambiental y económico, no obstante las altas concentraciones de hidrocarburos o la presencia de otros contaminantes como metales pesados y compuestos clorados pueden limitar el tratamiento.

La biorremediación es muy versátil, existen opciones para tratar suelo y agua, subterránea o retenida en presas, lagos y lagunas. El tratamiento puede aplicarse *in situ* o *ex situ*, y la adición de nutrientes y microorganismos exógenos está en función de las características del material geológico.

Una tecnología de biorremediación seria debe contar con un respaldo científico, sin embargo, en el mercado ambiental se comercializan productos microbianos y aditivos químicos de composición desconocida, que no son efectivos e incluso pueden aumentar el riesgo de un problema de contaminación, más que de remediación (17).

La biorremediación es considerada como la más deseable aproximación a la remediación de suelos contaminados en contraste a alternativas más costosas y de menor aceptación pública como la incineración. Los tratamientos biológicos de degradación en suelos pueden ser eficientes y económicos si las condiciones de biodegradación son optimizadas (26).

Las tecnologías conocidas como *landfarming*, *land treatment* o *land application*, son métodos de remediación de hidrocarburos de petróleo a través de la biodegradación. Una de las técnicas de biorremediación más difundidas es el *landfarming* que consiste en un vertido controlado de hidrocarburos sobre una superficie de terreno, el cual se somete a un proceso de remoción mediante arado y riego superficial con agregado de fertilizantes, con o sin incorporación de microorganismos (26).

Los parámetros que deben considerarse para evaluar la efectividad del *landfarming* se encuentran relacionados en la tabla 2.1

Tabla 2.1. Parámetros para evaluar la efectividad de la técnica de *landfarming*.

Características del suelo	Características del contaminante	Condiciones climáticas
Densidad microbiana	Volatilidad	Temperatura ambiental
pH	Estructura química	Lluvias
Contenido de humedad	Concentración y toxicidad	Viento
Temperatura		
Concentración de nutrientes		
Textura		

Fuente: CAREC- 2004.

El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de organismos vivos para la degradación de los contaminantes orgánicos. La actividad biológica altera la estructura molecular del contaminante y el grado de alteración determina si se ha producido el proceso de biotransformación o de mineralización. La biotransformación es la descomposición de un compuesto orgánico en otro similar no contaminante o menos tóxico, mientras que la mineralización es la descomposición de dióxido de carbono, agua y compuestos celulares.

2.2.2 EXTRACCIÓN

Se han desarrollado diversas tecnologías para la extracción de hidrocarburos pesados que se asocian a la estructura del suelo, como el aceite crudo mediante estas tecnologías se puede separar el producto para reciclarlo, si en el suelo queda hidrocarburo residual puede aplicarse otro tratamiento para alcanzar los niveles de limpieza.

2.2.3 FIJACIÓN

Los métodos de microencapsulación y solidificación son ejemplos de tecnologías para la fijación de los hidrocarburos a las partículas de suelo (17). Esta técnica constituye una técnica tradicional de disposición de desechos sólidos en el cual siguiendo un proceso de neutralización u otro proceso físico químico se logra reducir el volumen del desecho (26). Mediante estas técnicas se pretende inmovilizar los contaminantes en la estructura del suelo, de tal forma que no pueden migrar. Algunas tecnologías de este tipo aseguran que después del tratamiento, se puede proceder a la siembra de especies vegetales.

Otra opción de fijación es la incorporación de asfalto a suelos contaminados con petróleo, y su utilización en la construcción de caminos. En ambos casos es necesario hacer un seguimiento posterior al tratamiento para asegurarse de que los contaminantes permanecen retenidos a través del tiempo y que no están lixiviando.

2.2.4 INCINERACIÓN

Se recomienda únicamente para suelos con muy altas concentraciones de contaminantes que no puedan ser sometidos a otro tipo de tratamiento, pero se tiene la desventaja de que junto con los contaminantes, el suelo también se destruye (17; 29). En términos generales se

puede afirmar que los productos generados por la incineración son gases y sólidos inertes (26).

2.2.5 DESORCIÓN TÉRMICA

Es un proceso térmico en el cual se somete al suelo a unas temperaturas entre 250 °C y 550 °C para conseguir la desorción en lugar de la destrucción de los contaminantes. Con esta técnica se puede tratar la contaminación producida por compuestos orgánicos volátiles con un peso molecular no muy elevado como el caso de los lubricantes, aceites minerales, gasolinas, entre otros y determinados metales pesados volátiles como el mercurio. Con esta técnica hay que controlar el paso de los contaminantes a la fase gaseosa, eliminándolos por ejemplo en una cámara de combustión o fijándolos sobre carbón activado. El inconveniente de esta técnica radica en la pérdida de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (26).

2.2.6 FILTRACIÓN

Algunos hidrocarburos pueden solubilizarse en el agua, por lo que no pueden ser separados de ésta durante la extracción de la capa de producto libre. En el caso de aguas subterráneas se aplica el bombeo- tratamiento- inyección, el tratamiento consiste en filtrar a través de carbón activado, en el cual se quedan retenidos los hidrocarburos solubles y se obtiene agua libre de ellos. Los filtros tienen una cierta capacidad de retención, por lo que deben ser renovados periódicamente el carbón activado con hidrocarburos puede someterse a tratamiento biológico para transformar los contaminantes, o bien, llevarse a confinamiento.

2.2.7 CONFINAMIENTO

Consiste en la estabilización y dilución de los sólidos mediante un proceso de mezcla con suelo fresco. El residuo debe ser mezclado al menos en una proporción 1:1 y como máximo 3:1, para posteriormente ser cubierto en un lugar definido con suelo limpio de composición arcillosa y a una distancia no menor a 1 m del nivel del manto freático (26). Un claro ejemplo lo constituye los suelos que están contaminados con altas concentraciones de metales pesados, bifenilos policlorados o compuestos altamente clorados, por lo cual generalmente se recomienda su confinamiento (29). En estos casos, se requiere aplicar un pretratamiento para eliminar la fase líquida, en virtud de que no se permite el confinamiento de materiales peligrosos en estado líquido (17).

2.3 VARIABLES A MONITOREAR

La aplicación de técnicas de biorremediación de suelos exige un intenso monitoreo y control de variables operacionales. No todas las variables evaluadas revisten la misma importancia, de hecho sólo algunas resultan críticas para la obtención de resultados exitosos.

Los parámetros críticos a considerar en un tratamiento biológico son: tipo y concentración de contaminante, concentración de microorganismos, concentración de nutrientes, aireación, condiciones macroambientales, presencia de inhibidores y biodisponibilidad del contaminante (25).

2.3.1 TIPO Y CONCENTRACIÓN DEL CONTAMINANTE

2.3.1.1 TIPO DE HIDROCARBURO

La biodegradabilidad de un compuesto orgánico se debe a que es utilizado por los microorganismos como fuente de carbono. No todos los compuestos se degradan con la misma facilidad (24; 25).

Los compuestos alifáticos de cadena lineal (parafínicos) se degradan fácilmente, pero cuando se incluyen como sustituyentes alcanos de cadena larga, se forman estructuras ramificadas estéricamente inaccesibles para la degradación. De la misma forma, los compuestos alifáticos insaturados se degradan más lentamente que los saturados.

Los compuestos aromáticos simples se degradan por diferentes aperturas del anillo. La incorporación de halógenos disminuye la degradabilidad por estabilización del anillo. También se pueden degradar los compuestos aromáticos policlorados como los policlorobencenos cuya biodegradabilidad disminuye al aumentar el número de átomos de cloro en la molécula.

Los compuestos nitrogenados y azufrados se degradan lentamente. Los compuestos más resistentes al ataque microbiano son las fibras sintéticas (25).

2.3.1.2 CONCENTRACIÓN DE HIDROCARBUROS

Cuando la concentración de contaminante es alta puede ocurrir que se produzca inhibición del desarrollo microbiano (disminución de su capacidad metabólica) conllevando en algunos casos hasta su muerte. Se han registrado en ensayos de campo procesos biológicos a concentraciones de hasta 30%, medido por extracción sucesiva con solventes. Por encima de este valor se ha demostrado una muy baja degradación del hidrocarburo, y hasta en algunos casos ésta puede llegar a ser nula.

2.3.1.3 ANTIGÜEDAD DE LA CONTAMINACIÓN

Los niveles de contaminación varían mucho según las fuentes de hidrocarburos y la antigüedad de las instalaciones petroleras (27).

A medida que transcurre el tiempo después de un derrame se va modificando la composición del hidrocarburo por acción de los agentes ambientales. Primero se pierden los volátiles y después se produce la eliminación de parafinas, ya sea por evaporación, por actividad fotoquímica o por actividad biológica, posteriormente se eliminan los otros componentes. Como resultado de lo anterior el contaminante se enriquece en compuestos

pesados, más difíciles de degradar, por lo que la velocidad de reacción disminuye a medida que pase el tiempo.

Es importante durante el proceso de biorremediación evaluar la efectividad del mismo, razón por la cual la determinación de la concentración de hidrocarburos es un buen indicador (31). Los hidrocarburos de petróleo constituyen un número muy grande de compuestos químicos, por lo cual para determinar esta diversidad de compuestos se pueden utilizar varias técnicas analíticas. Tanto en suelo como en agua los hidrocarburos deben ser extraídos con un solvente adecuado y posteriormente los compuestos que han sido solubilizados son analizados por varios métodos, el tipo de hidrocarburo que se desee analizar indicará el solvente a utilizar.

2.3.2 PRESENCIA DE MICROORGANISMOS

Los microorganismos pueden degradar hidrocarburos y otras sustancias contaminantes en forma de cultivos puros o cultivos mixtos. Es este último caso, el tratamiento biológico implica una compleja interacción de especies microbianas (18). La velocidad de crecimiento y la utilización de sustratos es generalmente superior en cultivos mixtos que en cultivos puros (32). En una mezcla de poblaciones los consumidores primarios inician el proceso de degradación y los consumidores secundarios utilizan los productos metabólicos de los primeros para degradarlos (25; 31). Además pueden facilitar el crecimiento de los primarios, suministrándoles productos metabólicos (como factores de crecimiento), eliminando productos tóxicos mediante cometabolismo y produciendo intercambio de material genético (33). Efectivamente, los microorganismos aislados en suelos poseen actividades de peroxidasas y oxigenasas, que permiten la oxigenación de algunas fracciones del petróleo. Esta oxidación cambia las propiedades de los compuestos haciéndolos susceptibles a ataques secundarios y facilitando su conversión a dióxido de carbono y agua (20, 27).

Si bien la mayor parte de las sustancias orgánicas son degradables por vía biológica, existe una gran cantidad de compuestos que resisten la biodegradación (recalcitrantes) o ésta ocurre tan lentamente que hace ineficaz el tratamiento biológico en forma práctica (33).

Virtualmente todos los suelos y sedimentos que se han expuesto a hidrocarburos del petróleo contienen bacterias degradadoras de hidrocarburos, y es muy probable que sea mejor la adaptación del suelo a las condiciones locales del suelo que la importación de bacterias aisladas provenientes de otros campos petroleros, en diferentes suelos y condiciones climáticas (27).

Por otro lado, se han logrado aislar microorganismos capaces de degradar compuestos considerados recalcitrantes, o de modificarlos químicamente de forma que permitan la acción degradadora de otros microorganismos. Para el caso del tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos se requiere una concentración mínima de microorganismos degradadores específicos de 10^3 a 10^4 unidades formadoras de colonia/gramo de suelo (ufc/g) y de microorganismos heterótrofos totales de 10^5 a 10^6 ufc/g de suelo. Si esta masa crítica no es suficiente se pueden incorporar microorganismos al suelo mediante la inoculación o a través del proceso denominado como bioaumentación. También se puede lograr un incremento importante estimulando la población microbiana existente por incorporación de nutrientes (33).

2.3.2.1 INOCULACIÓN

Este proceso incorpora microorganismos al suelo para realizar una función específica, como es la degradación de contaminantes (20, 32). Los microorganismos pueden ser comerciales o preparados para un fin específico. La inoculación se usa cuando los microorganismos del suelo no pueden degradar el contaminante presente, o cuando se produce inhibición por presencia de sales o metales pesados o cuando no alcanzan la masa crítica necesaria (20). La anterior situación puede presentarse también en suelos de muy baja fertilidad con bajos porcentajes de materia orgánica y poca captación de agua (27).

Como desventaja, los microorganismos inoculados pueden desplazar a los existentes en el suelo por procesos de competencia y lograr poco efecto degradador o bien pueden no adaptarse a las condiciones ambientales del lugar. También puede ocurrir que no puedan competir con los microorganismos nativos y el efecto es nulo.

2.3.2.2 BIOAUMENTACIÓN

Este proceso implica incrementar drásticamente la masa microbiana del suelo mediante la adición de microorganismos similares a los presentes en el suelo obtenidos mediante cultivo en reactores biológicos (28, 34). Los microorganismos se obtienen del suelo contaminado del lugar (32, 33, 34). En laboratorio se definen los consorcios microbianos más adecuados con base a la tolerancia a sales y sustancias inhibitoras y también a la capacidad de degradación de hidrocarburos. De esta forma se pueden tener consorcios que actúan en forma simbiótica. Una vez obtenido el consorcio más adecuado se produce una masa importante de microorganismos y se llevan a campo para reforzar la actividad de los que ya existen (34). En algunos casos, dependiendo del tipo de contaminantes es necesario realizar varias aplicaciones (33).

2.3.3 NUTRIENTES

Son sustancias químicas necesarias para el desarrollo de los microorganismos y se pueden dividir en cuatro grupos: fuentes de carbono, fósforo, nitrógeno y micronutrientes (3, 24, 25, 27, 35). La fuente de carbono está suministrada por el contaminante, y proporciona el carbono necesario para producir compuestos celulares, productos metabólicos (CO₂, agua, enzimas) y masa celular.

La fuente de nitrógeno proporciona el elemento necesario para la producción de aminoácidos y enzimas dado que la utilización de estos compuestos es muy rápida, los suelos no alcanzan a cubrir todas las necesidades del proceso y deben ser incorporados bajo la forma de fertilizantes de uso agrícola como urea o sulfato de amonio. Los suelos ricos en este nutriente tienen una marcada actividad metabólica y la capacidad de desarrollar biomasa (28).

También se pueden utilizar fertilizantes de origen orgánico como estiércol. La fuente de fósforo interviene en la formación de compuestos energéticos dentro de la célula que se utilizan en los procesos de reproducción y degradación. Dado que la utilización de este compuesto es muy rápida, los suelos no alcanzan a cubrir todas las necesidades del proceso y deben ser incorporados bajo la forma de fertilizantes de uso agrícola como fosfato

diamónico o fosfato tricálcico. Este parámetro es de importancia crítica para el buen desarrollo del proceso. La fuente de micronutrientes constituye un conjunto variado de elementos como hierro, cobre, zinc, azufre, cobalto, manganeso, magnesio, calcio, entre otros que dependen del tipo de microorganismo presente y del proceso metabólico a llevarse a cabo. La concentración de estos oligoelementos son mínimas (< 1 ppm). La dosificación de nitrógeno y fósforo se realiza en función de la concentración del contaminante de acuerdo a una relación que vincula C:N:P que varía según los autores entre 100:10:1 a 100:2:0.2 (12, 28, 31).

2.3.4 AIREACIÓN

La presencia de oxígeno es importante para la degradación de hidrocarburos, ya que es un proceso aeróbico (31, 35). En los procesos de campo la aireación se produce por remoción del suelo con herramientas agrícolas. Estos tratamientos responden de diferente manera de acuerdo a la frecuencia de remoción (25, 27).

2.3.5 CONDICIONES AMBIENTALES

2.3.5.1 pH

El pH del suelo es importante para el desarrollo de los microorganismos degradadores, siendo los más adecuados los comprendidos entre 6 y 8 (24; 27). Cuando el pH excede se debe disminuir el mismo mediante la adición de azufre al suelo. Si es menor se puede incrementar mediante la incorporación de carbonato de calcio o hidróxido de calcio al suelo. En todos los casos de modificación del pH del suelo se deben realizar ensayos previos para definir la masa a incorporar de azufre o de carbonato según sea el caso.

Cuando se encuentran metales pesados en el terreno a muy altas concentración se debe trabajar a un pH que mantenga el metal inmovilizado o en forma no soluble, para disminuir la toxicidad de los microorganismos. En estos casos es conveniente evaluar la posibilidad de trabajar a pH distintos de los óptimos para evitar efectos tóxicos (31).

2.3.5.2 HUMEDAD

El agua es importante para el desarrollo de los microorganismos ya que actúa como medio de transporte de nutrientes y oxígeno a la célula (24). Es conveniente mantener una humedad del orden del 70% con respecto a la capacidad de campo, la cual se define como la masa de agua que admite el suelo hasta la saturación, que depende de cada tipo de suelo.

Un exceso de humedad produce inhibición del proceso por anaerobiosis, un déficit impide el desarrollo celular (25, 27, 31).

2.3.5.3 TEMPERATURA

La temperatura influye en la velocidad de degradación dependiendo del tipo de microorganismos disponibles. Normalmente las temperaturas más adecuadas se encuentran entre 20 °C y 40 °C (24, 27). La velocidad de degradación aumenta con la temperatura, sin embargo cuando se supera los 40 °C se produce una disminución de la actividad microbiana, o bien se produce una rotación poblacional hacia especies más resistentes a las altas temperaturas, como ocurre en los procesos de compostaje en donde se alcanzan temperaturas de 65 °C (31).

Adicionalmente, la temperatura influye en el proceso de biodegradación ya que ésta afecta la naturaleza física y química de los hidrocarburos. Efectivamente cuando la temperatura es baja la viscosidad del petróleo aumenta variando su solubilidad en el agua y se disminuye la volatilización de algunas fracciones tóxicas que pueden afectar la actividad degradadora de los microorganismos. En caso de presentarse temperaturas altas se incrementa la toxicidad de los hidrocarburos inhibiendo la actividad microbiana (12).

2.3.5.4 PRESENCIA DE METALES PESADOS Y SALES

Los metales y las sales en altas concentraciones intoxican a los microorganismos o actúan como biocidas. Entre éstos se incluyen metales pesados, sodio en alta concentración, sales inorgánicas (NaCl, sulfatos, carbonatos, entre otros). En general la presencia de sales y metales disminuye la velocidad de degradación en forma importante a menos que se disponga de microorganismos tolerantes en el lugar de tratamiento o se haya producido una bioaumentación con consorcios resistentes. En el caso de los metales se puede aumentar el pH del suelo para inmovilizarlos y así disminuir la toxicidad sobre los microorganismos. Si se tienen suelos muy contaminados con metales o sales se deberían diluir con suelo limpio para poder llevar a cabo el proceso biológico. Los microorganismos no degradan contaminantes inorgánicos, solo pueden alterar su forma química, de forma de inmovilizarlos o eliminarlos del lugar mediante lixiviación de los compuestos solubles por el agua de lluvia o volatilización. Algunos microorganismos fijan sobre su estructura celular metales en forma activa (metabolismo) o pasiva (absorción y adsorción) reteniéndolos e impidiendo que migren (27, 36).

2.3.5.5 BIODISPONIBILIDAD

La degradación de un contaminante en suelo depende de una serie de factores, entre ellos, actividad de los microorganismos y transferencia de masa desde el suelo hasta el microorganismo. En estudios de campo, el incremento de la capacidad de los microorganismos no siempre conduce a un aumento de la velocidad de degradación. Este hecho es aún más evidente en derrames o contaminaciones antiguas en donde la reducción de la biodisponibilidad en el tiempo se debe a un proceso de envejecimiento.

2.3.6 INDICADORES DE CALIDAD AMBIENTAL

Una vez seleccionada la técnica a aplicar para remediar, es importante establecer los niveles de limpieza evitando que se generen impactos significativos en el ambiente y/o en

la salud humana. En respuesta a lo anterior la legislación vigente de cada país ha desarrollado una serie de instrumentos de gestión ambiental (37, 38).

Para el caso específico del Perú, estos instrumentos corresponden a Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) (38), los cuales están diseñados e implementados para dar cumplimiento a la política ambiental nacional y a las normas ambientales del país. Lo anterior sugiere que corresponden a parámetros y obligaciones que buscan regular y proteger la salud pública y la calidad del ambiente, permitiendo que la autoridad ambiental desarrolle acciones de control, seguimiento y fiscalización de los efectos causados por actividades antropogénicas.

2.3.6.1 ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL –ECA

El ECA es un instrumento de gestión ambiental. El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente

La medición de estos elementos o productos se realiza directamente en los cuerpos receptores (agua, suelo o aire) dependiendo del caso (39).

2.3.6.2 LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE - LMP

El LMP es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (39).

Los LMP también tienen como finalidad proteger el medio ambiente y la salud humana frente a ciertos elementos y/o sustancias que puedan representar un riesgo, no obstante a diferencia de los ECA los LMP establecen un límite aplicable a las emisiones, efluentes o descargas al ambiente, individualizando los límites por actividad productiva. De esta forma, los LMP son exigibles y su cumplimiento es obligatorio.

Es importante señalar que los ECA toman valores referenciales menores a los expresados a los LMP, al ser de ámbito general sirven de objetivo para la elaboración y aprobación de los LMP.

A continuación la Tabla 2.2 registra las diferencias más significativas entre los ECA y los LMP:

Tabla 2.2. Aspectos diferenciales entre los Estándares de Calidad Ambiental- ECA y los Límites Máximos Permisibles - LMP.

Estándares de Calidad Ambiental- ECA	Límites Máximos Permisibles- LMP
Mide la concentración de elementos y/o sustancias en el, aire, agua o suelo (cuerpos receptores).	Mide la concentración de ciertos elementos, sustancias y/o aspectos físicos, químicos y/o biológicos que se encuentran presentes en las emisiones, efluentes o descargas generadas por una actividad productiva en particular.
Utilizados para establecer políticas ambientales públicas.	Son exigibles para cada sector en particular y su cumplimiento es obligatorio para cada empresa y/o persona perteneciente a él.
La medición se realiza directamente en el cuerpo receptor.	La medición se realiza en los puntos de emisión o vertimiento.
Actualmente, son propuestos por el Ministerio del Medio Ambiente (MINAM) previa evaluación y consulta.	Son propuestos por la autoridad sectorial correspondiente (Ministerios)
Su medición y vigilancia está a cargo de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y el MINAM.	Su medición hasta finales de 2008 está a cargo de Osinergmin. A partir de 2009, su fiscalización estará a cargo del MINAM.

Fuente: Informe quincenal de la SNMPE. Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. Octubre 2008.

2.3.6.3 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL DEL SUELO

Mediante Decreto Supremo No. 199-2007-CONAM/PCD de diciembre de 2007 se aprobó la Propuesta de Estándares Nacionales de calidad ambiental para el suelo, la cual se encuentra aún en Consulta Pública. Sin embargo, se está considerando como información de referencia. En dicho documento se proponen los niveles de concentración de algunos elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el suelo en su condición de cuerpo receptor de tal forma que no representan riesgo significativo para la salud de las personas ni del ambiente. Estos elementos se encuentran reseñados en la tabla N° 01 del Artículo 1.

En lo referente a los TPH, los ECA para suelo proponen que dichos elementos no deben sobrepasar las 5000 ppm para suelos de uso comercial/ industrial.

CAPÍTULO 3: CASO PRÁCTICO

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 ANTECEDENTES

La refinería en la cual se desarrolló el presente proyecto tiene una capacidad de almacenamiento de 2 549 000 barriles, de los cuales 250 000 son de crudo. Sus principales productos derivados son: gasolina motor (90 y 97 octanos), turbo A1, diesel, kerosene, solventes industriales y asfaltos.

Paralelamente al auge económico que la industria petrolera ha registrado en el país, las diferentes actividades petrolíferas han generando una serie de alteraciones al medio ambiente. Una de las problemáticas ambientales que se presenta en esta refinería es la contaminación a nivel de aguas subterráneas, evidente en el área de tanques, y que debido a los constantes movimientos del mar (mareas) ocasionan afloramientos de productos hidrocarbonados casi permanentes en la superficie, contaminando el suelo.

El presente proyecto se centró en uno de los tanques de almacenamiento de diesel en donde el objetivo era el de desarrollar una metodología para aislar la napa freática contaminada de cualquier contingencia que pudiera presentarse como consecuencias de derrames o fugas dentro del área estanca del tanque y la remediación del suelo de la misma, para lo cual se previó la implementación de un proceso combinado de ingeniería (construcción de filtros e impermeabilización) y biorremediación (*landfarming* y biodegradación).

3.1.2 RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto se ha desarrollado en el área estanca de un tanque de almacenamiento de diesel ubicado en una refinería localizada al noreste del país, en donde se pudo comprobar el efecto negativo de la presencia de contaminantes hidrocarbonados a nivel de suelo y agua subterránea, constituyendo un trabajo pionero en la implementación de una solución para la protección de la napa freática y el restablecimiento del suelo tal y como se puede evidenciar en las Figuras 3.1 y 3.2.



Figura 3.1.: Estado de referencia del lugar.



Figura 3.2.: Estado de referencia del lugar.

Efectivamente, mediante la aplicación de herramientas de ingeniería y de biotecnología se construyó en primera instancia un filtro natural impermeabilizado que permitió el aislamiento de la napa freática y en segundo lugar el tratamiento del suelo contaminado utilizando las técnicas de *landfarming* y biodegradación, buscando reducir la concentración de hidrocarburos hasta niveles por debajo del 2%, índice establecido como nivel de remediación en respuesta a una carencia, en ese momento de ejecución del proyecto (2001) de una normativa nacional ambiental que determinará las pautas de saneamiento para suelos contaminados con hidrocarburos.

Las diferentes actividades de este proyecto fueron ejecutadas bajo condiciones *in situ* y *ex situ*, a lo largo de cinco meses, enmarcadas dentro de políticas de seguridad industrial y protección ambiental del cliente. Los resultados obtenidos sugieren que la metodología utilizada representa una alternativa ambientalmente viable en la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos y la protección de las aguas subterráneas, evitando la posible contaminación de éstas en respuesta a fugas o derrames.

3.2 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE BIORREMEDIACIÓN

Teniendo en cuenta el objetivo del presente proyecto, reducir la concentración de hidrocarburos hasta niveles por debajo del 2% de TPH, se hace importante señalar que las diferentes actividades ejecutadas serán descritas considerando los dos campos de acción empleados: ingeniería y biotecnología.

También se hace conveniente indicar que las actividades fueron realizadas en condiciones *in situ* y *ex situ*.

En primera instancia se describirá la metodología empleada para la ejecución de las actividades dentro del campo de la ingeniería, como el movimiento de tierras y la aplicación de la técnica del *landfarming*. Finalizando con la descripción de la metodología empleada en el campo de la biotecnología, como la biodegradación.

3.2.1 ACTIVIDADES *IN SITU*

3.2.1.1 MOVIMIENTO DE TIERRAS

Esta etapa se basó principalmente en la ejecución de un proyecto de ingeniería, donde el objetivo principal se centró en la construcción de un filtro natural, ver Figura 3.8, previa excavación del material contaminado ubicado dentro del área estanca del tanque de almacenamiento de diesel, y su posterior reubicación en un área aledaña para llevar a cabo su tratamiento bajo condiciones *ex situ*.

A continuación se describen las actividades que se derivaron dentro del desarrollo de esta etapa del proyecto.

Levantamiento y replanteo topográfico: El levantamiento topográfico inicial, que incluye las fases de campo (toma de niveles en calicatas excavadas) y el posterior trabajo de gabinete (elaboración de secciones longitudinales y transversales), representaron el aporte de la ingeniería civil a la metodología empleada, ya que permitió calcular con mayor exactitud las áreas y los volúmenes a considerar dentro del área de trabajo y los cuales se registran en la Tabla 3.1.

Los trabajos de topografía, evidenciados en la Figura 3.3, fueron realizados de forma permanente durante todo el proceso de construcción del filtro natural, lo que permitió definir los niveles adecuados de las diferentes capas que lo conforman.

Cabe recalcar que el nivel máximo de excavación correspondió a encontrar la napa freática contaminada y/o suelo con un TPH por encima del 2%, lo que sucediera primero.

Tabla 3.1. Áreas y volúmenes determinados para la ejecución del proyecto.

Área total del área estanca del tanque de almacenamiento	6806,21 m ²
Área del tanque de almacenamiento	748 m ²
Diámetro del tanque de almacenamiento	30,48 m
Volumen del tanque de almacenamiento	8778 m ³



Figura 3.3.: Levantamiento topográfico.

El replanteo final permitió determinar la capacidad del área estanca luego de la construcción del filtro natural, asegurando el 110% mínimo de volumen respecto al volumen de refinado almacenado en el tanque; de igual manera es importante indicar que durante todo el desarrollo del proyecto se mantuvo la capacidad del área estanca debido a que el tanque de almacenamiento estuvo siempre operativo en caso de presentarse cualquier contingencia como caso de un derrame.

Excavación de material contaminado: Teniendo en cuenta la información que arrojaron las calicatas realizadas en diferentes puntos del área estanca del tanque de almacenamiento durante el levantamiento topográfico inicial, se determinó que el nivel aproximado de la napa freática se encontraba a 0,5 m del BM (*Bechmarking*) topográfico referencial utilizado (parte superior del anillo del tanque- Figura 3.4).



Figura 3.4.: Contaminación de napa freática.

El volumen total de suelo contaminado excavado, entendiéndose como suelo a la mezcla de arcilla (lutita) y en menor proporción de agregado grueso, fue de 3869,87 m³.

La actividad de excavación fue llevada a cabo mediante el uso de maquinaria pesada tipo cargador frontal, tractor de oruga y retroexcavadora, las cuales ingresaron a la mayor parte de zonas del área de trabajo mediante la construcción de dos accesos que atravesaron el muro de contención del área estanca de material afirmado con una capa final asfáltica.

En algunos puntos se presentaron inconvenientes, que fueron superados oportunamente, debido a problemas de arenamiento de la maquinaria pesada en respuesta al exceso de humedad retenida por la arcilla como se puede observar en la Figura 3.5.

Paralelamente, se encontraron zonas en donde el ingreso de maquinaria pesada se dificultaba, razón por la cual se aplicó como estrategia la construcción de un puente de arcilla compactada que pasaba por encima de las tuberías de líneas de drenaje en operación como se puede comprobar en la Figura 3.6.



Figura 3.5.: Excavación del suelo contaminado.



Figura 3.6.: Excavación de suelo contaminado.

Finalmente en otras zonas, en donde el sistema de tuberías era denso, el retiro de material contaminado se efectuó de forma manual, con herramientas manuales.

Remoción del material contaminado: Esta actividad corresponde al carguío y transporte de material contaminado desde el área estanca hasta una zona aledaña adecuada para facilitar el tratamiento del material mediante la aplicación de la técnica de *landfarming*. Los equipos utilizados fueron cargadores frontales y volquetes de 10 m³ de capacidad en promedio como se puede observar en la Figura 3.7.



Figura 3.7.: Carguío de suelo contaminado.

3.2.1.2 CONSTRUCCIÓN DEL FILTRO NATURAL

La finalidad de construir un filtro natural se basó en la disminución paulatina de las presiones del flujo ascendente de la napa freática, y su recubrimiento final con geomembrana permitió la impermeabilización del área estanca impidiendo que la napa freática contaminara nuevamente el material recuperado. La distribución de las capas que conformaron el filtro natural se detalla en la Figura 3.8.

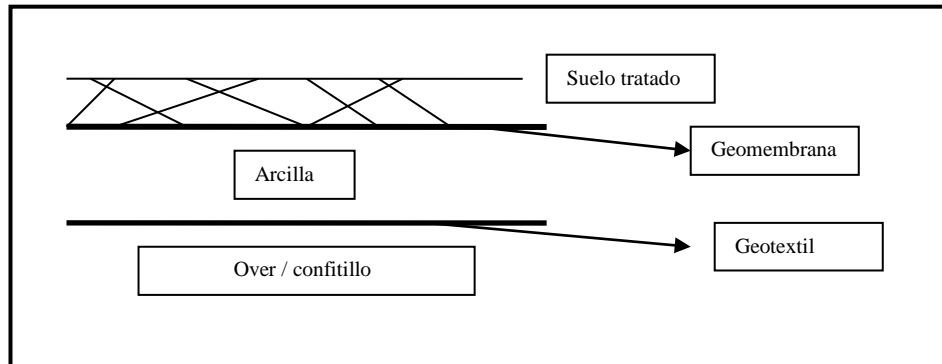


Figura 3.8.: Figura de corte transversal de las diferentes capas de filtro natural.

La Tabla 3.2 recopila la información más importante de cada una de las capas utilizadas así como algunas observaciones a considerar.

Tabla 3.2. Volúmenes de material utilizados en la construcción de las capas en filtro natural.

Descripción	Volumen y/o capas	Observaciones
Over/ Confitillo	1239 m ³	Capa de 20 cm de espesor (Figura 3.9 y Figura 3.10)
Geotextil	01 sola capa	Evita que la capa de arcilla llene los espacios vacíos que se forman en la capa de agregado grueso al momento que la napa freática disminuye su nivel y arrastra las partículas de arcilla. (Figura 3.11)
Arcilla	943,5 cm ³	Capa de 16 cm de espesor compactada, luego de humectar. Presenta una pendiente de 1 cm cada 10 m de longitud en dirección a la poza de aguas pluviales.
Geomembrana GSE HDPE	8480 m ²	1,5 mm de espesor (Figura 3.12)



Figura 3.9.: Construcción de filtro natural.



Figura 3.10.: Compactación de filtro natural.



Figura 3.11.: Construcción de filtro natural.



Figura 3.12.: Vista aérea del tanque terminado.

Con el fin de reducir la contaminación por hidrocarburos de la napa freática, se procedió a construir dos pozas de recuperación de los líquidos hidrocarbonatos sobrenadantes (flotantes), construidos con un tubo metálico perforado y recubierto en la parte externa superior con concreto armado de resistencia a la compresión de 210 kg/cm^2 , y en la parte externa inferior por una capa de grava que cubre las perforaciones del tubo metálico como se muestra en la Figura 3.13 y Figura 3.14.

El hidrocarburo líquido recuperado en los mismos fue retirado mediante bomba y cisterna de propiedad del cliente.



Figura 3.13.: Construcción de pozas de recuperación.



Figura 3.14.: Pozas de recuperación terminadas.

De igual forma, para evitar la acumulación de agua de lluvia, se construyó una poza de recolección de aguas pluviales de dimensiones $1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$, recubierta por concreto armado de resistencia a la compresión de 210 Kg/cm^2 para la cual se utilizó cemento tipo V.

3.2.2 ACTIVIDADES EX SITU

3.2.2.1 TRABAJO DE LABORATORIO

Paralelamente a los trabajos de ingeniería anteriormente descritos ejecutados en condiciones *in situ* (movimiento de tierras y construcción de filtro natural), se llevaron a cabo pruebas microbiológicas en el laboratorio a fin de seleccionar microorganismos nativos degradadores de hidrocarburos, para ser aplicados bajo el concepto de biodegradación, y que junto a la técnica de *landfarming* permitieron la efectiva eliminación de los contaminantes hidrocarbonados presentes en el suelo removido del área estanca del tanque de almacenamiento, hasta alcanzar concentraciones por debajo del 2% de TPH.

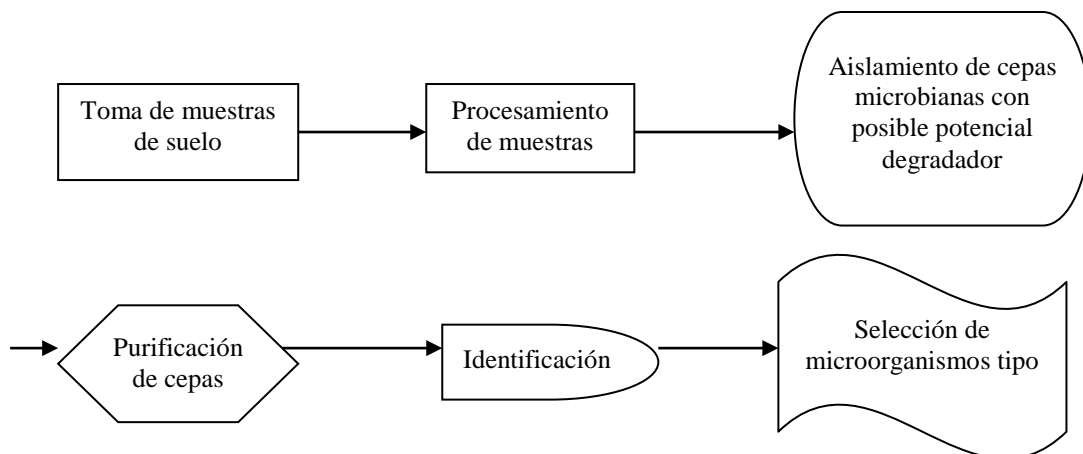
Para realizar el tratamiento del suelo, éste fue dispuesto en biopilas como se puede evidenciar en la Figura 3.15. Las biopilas formadas son pilas de material biodegradable de dimensiones constantes formadas por suelo contaminado y materia orgánica (20).

Estas biopilas fueron formadas utilizando retroexcavadora de neumáticos.



Figura 3.15.: Material dispuesto para tratamiento.

A continuación se detalla en la Figura 3.16 la metodología utilizada en el laboratorio para la implementación de la técnica de biodegradación.



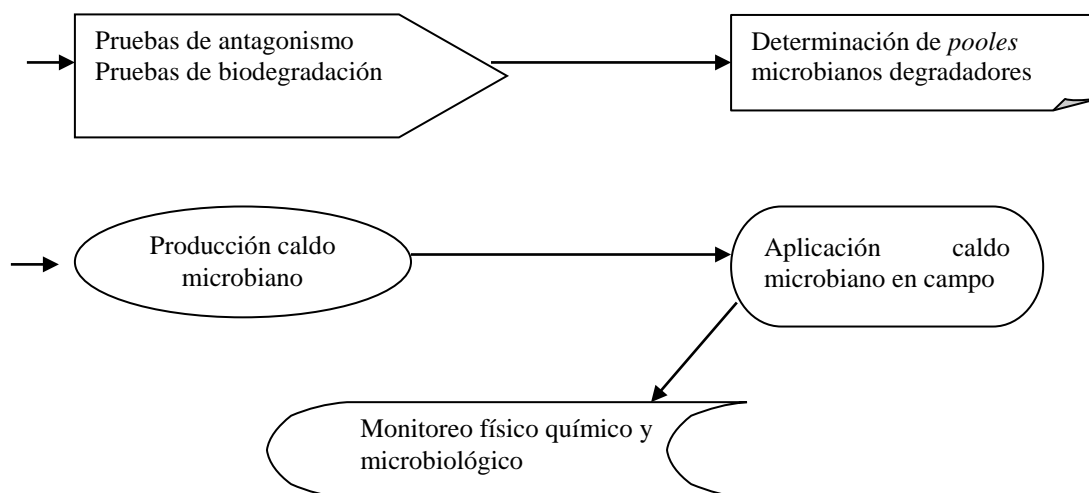


Figura 3.16.: Diagrama de flujo del proceso.

Aislamiento y selección de cepas microbianas con posible potencial degradador: Las muestras de suelo provenientes del área estanca del tanque de almacenamiento fueron procesadas siguiendo la técnica de siembra en placa en superficie en medios de cultivo enriquecidos, selectivos y diferenciales como lo evidencian la Figura 3.17 la Figura 3.18.



Figura 3.17.: Actividades de laboratorio.



Figura 3.18.: Actividades de identificación.

Luego de transcurrido el tiempo de incubación se llevó a cabo una selección de las cepas microbianas teniendo en cuenta como criterio las diferencias macroscópicas desarrolladas (forma de la colonia, tamaño, color, consistencia, entre otros) y que se son visibles en la Figura 3.19.

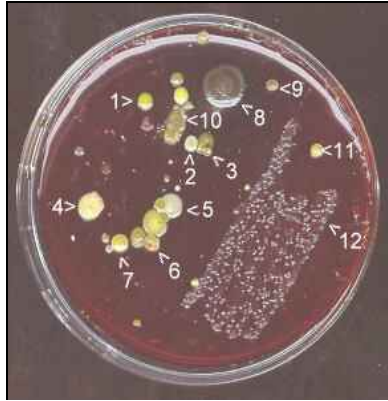


Figura 3.19.: Diversidad de morfología macroscópica de colonias microbianas.

Se aisló un total de 53 cepas microbianas, de las cuales 46 de ellas pudieron propagarse bajo condiciones de laboratorio.

Identificación de cepas: El principal criterio utilizado para la identificación de las cepas microbianas se basó en la morfología microscópica mediante la aplicación de la coloración diferencial de Gram.

Los microorganismos aislados en su totalidad fueron definidos como bacterias y fueron identificados siguiendo los parámetros reseñados en el Manual de Bergey de Bacteriología Sistemática. La relación cualitativa y cuantitativa de los géneros y especies encontrados se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Identificación cuantitativa y cualitativa de microorganismos. (*)

BACTERIAS GRAM POSITIVAS		BACTERIAS GRAM NEGATIVAS	
<i>Micrococcus</i> spp	35 %	<i>Pseudomonas</i> spp	29 %
		Predominio <i>P. aeruginosa</i>	4,5 %
		<i>Pseudomonas</i> grupo fluorescente	
<i>Bacillus</i> spp	24.5%	<i>Enterobacter</i> spp	4,5 %
<i>Staphylococcus</i> spp	7 %		

Teniendo en cuenta parámetros fisiológicos como la presencia de enzimas oxidadoras y la respiración aeróbica, principalmente, se seleccionaron veinte (4) cepas bacterianas las cuales fueron evaluadas para determinar sus propiedades degradadoras. Las otras cepas fueron eliminadas debido a la síntesis de productos no deseados durante el metabolismo bacteriano como el ácido sulfúrico (H₂S), y por presentar un metabolismo fermentador.

Evaluación de biodegradación bajo condiciones *in vitro*: Teniendo en cuenta que el suelo contenido en el área estanca del tanque de almacenamiento se ha contaminado a través del tiempo principalmente por acción de la napa freática y debido a la diversidad de productos refinados que pudieran encontrarse, se hace necesaria la aplicación de una mezcla de bacterias heterogéneas asegurando una mayor degradación de los contaminantes presentes.

Los ensayos de biodegradación empleados para el presente proyecto se basaron en la capacidad de crecimiento en medios de cultivo complejos cuya única fuente de carbono era

* Los porcentajes que se resaltan corresponden a la frecuencia de las especies indicadas con respecto al porcentaje total de población bacteriana viable aislada.

suministrada por el hidrocarburo; los compuestos evaluados fueron: n-hexano, fenol y diesel y cuyos montajes se observan en la Figura 3.20.

Con base en los resultados obtenidos se seleccionaron 06 cepas bacterianas, a las cuales, previamente se les había realizado pruebas de antagonismo con el fin de determinar reacciones de competencia entre estas cepas, que pudieran interferir en la efectividad del proceso de biodegradación, como se demuestra en la Figura 3.21.



Figura 3.20.: Pruebas de biodegradación.



Figura 3.21.: Pruebas de antagonismo.

Preparación del caldo bacteriano: Cuando las poblaciones de bacterias nativas son bajas o hasta inexistentes, situación que se presenta en suelos de muy baja fertilidad caracterizados por un bajo porcentaje de materia orgánica y muy poca captación de agua se hace conveniente agregar una fuente externa de bacterias (27).

Las cepas bacterianas propagadas fueron aisladas del mismo sitio contaminado asegurando que al ser inoculadas de nuevo al suelo se ajusten a las condiciones del sitio (20, 27).

Las cepas bacterianas fueron propagadas en medio de cultivo constituido por melaza, urea y sales inorgánicas. El inóculo semilla fue adicionado al tanque de producción asegurando una concentración final de 10^7 células/g de suelo.

Finalmente, una vez el suelo contaminado fue reubicado en una zona aledaña se procedió a la implementación de la técnica de *landfarming*, permitiendo su tratamiento bajo condiciones *ex situ*. Se hace necesario indicar que antes de dar inicio a las diferentes actividades propias del *landfarming* se realizó una actividad de zarandeo del material contaminado con el fin de eliminar el agregado grueso (*over*) y asegurar el retorno del suelo remediado evitando que grandes partículas alteren la integridad de la geomembrana.

3.2.2.2 TRABAJO DE CAMPO

Dosificación de nutrientes: Debido a que la disponibilidad de N y P en el suelo es un factor limitante en la degradación microbiana de hidrocarburos, se debe ajustar la proporción C/N/P mediante la adición de fertilizantes de uso agrícola y de esta manera acelerar el proceso de biodegradación (12).

Teniendo en cuenta que el tipo de suelo afectado por los hidrocarburos corresponde a las denominadas tierras de protección y para el mantenimiento de un equilibrio nutricional para mantener la actividad metabólica de las poblaciones heterogéneas bacterianas degradadoras, se hizo necesario la dosificación de nutrientes tipo nitrógeno en forma de urea, potasio y fósforo, en forma de fertilizante tipo triple 20, con base a los parámetros

descritos en la Tabla 3.4., de igual manera se aplicó materia orgánica bajo la forma de estiércol de ganado vacuno.

Tabla 3.4. Niveles críticos de concentración permisibles para nutrientes en suelos peruanos

Nutriente	Bajo	Medio	Alto
Materia Orgánica (%)	0,15 – 2,0	2,1 – 4,0	> 4,1
Nitrógeno (ppm)	< 1000	1000 – 2000	>2000
Fósforo (ppm)	0 – 6	7 – 15	> 15
Potasio (ppm)	0 – 250	255 – 350	> 355

Fuente: Ministerio de Agricultura – Boletín técnico 1973

Oxigenación del material: El volteo del material en tratamiento, de forma manual como lo registra la Figura 3.22 y de forma mecánica en la Figura 3.23, permitió brindarle al suelo las condiciones adecuadas de oxígeno, porosidad, textura y disponibilidad del contaminante para favorecer el proceso de biodegradación. Éstos fueron realizados a intervalos regulares de tiempo.



Figura 3.22.: Actividad de volteo manual.



Figura 3.23.: Actividad de volteo mecánico.

Mantenimiento de la humedad: La humedad es fundamental para el proceso de biodegradación de los hidrocarburos ya que provee a los microorganismos un vehículo adecuado para su distribución. Las actividades de riego se realizaron de forma regular, en horas de la tarde a fin de permitir la mayor penetrabilidad del agua a los diferentes niveles del suelo, reduciendo al máximo procesos de evaporación en respuesta a las condiciones medio ambientales.

Aplicación del caldo bacteriano: Ésta fue llevada a cabo sobre el material contaminado y preparado mediante algunas de las actividades ejecutadas dentro de la técnica de *landfarming*, asegurando de esta forma que el TPH registrado se encontraba dentro del rango establecido para asegurar la optimización de la biodegradación de hidrocarburos. La aplicación del caldo microbiano se puede observar en la Figura 3.24.



Figura 3.24.: Actividad de aplicación del caldo bacteriano.

Monitoreo: La biodegradación en el suelo es un proceso que combina las actividades metabólicas de la diversidad microbiana y las interacciones entre los complejos ambientales físicos, químicos y biológicos (31). A pesar de la complejidad del proceso, se han descrito diversas metodologías que permiten medir la actividad biodegradadora.

El muestreo de referencia se realizó al inicio del proyecto (antes de iniciar la fase de movimiento de tierras) con el objetivo de establecer las condiciones de referencia, posteriormente se programaron muestreos cada tres semanas para determinar la variación de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos en respuesta a las técnicas aplicadas. Los sitios de muestreo fueron seleccionados al azar siguiendo una ruta en “X” o en zigzag “Σ”. En cada sitio de toma de muestra se tomaron de seis a ocho submuestras para conformar una única muestra compuesta.

Se tomó un total de 20 muestras las cuales fueron analizadas para la determinación de parámetros microbiológicos, posteriormente con base a estas 20 muestras se prepararon siete muestras compuestas para la determinación de las variables físico químicas.

La relación de los análisis efectuados se registra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Análisis y métodos utilizados para el monitoreo

Parámetro	Método
Recuento población heterótrofa bacteriana total	Recuento en superficie
Recuento población bacteriana con posible potencial degradador	Recuento en superficie
pH	Instrumental
Humedad (%)	Gravimetría
Contenido de materia orgánica (%)	Calcinación
Concentración de cloruros (ppm)	Método de Mohr
Concentración de fósforo (ppm)	ICP
Concentración de nitrógeno (%)	ASTM D-3228 Kjeldahl modificado
Concentración de potasio (ppm)	ICP
TPH (%)	EPA 418.1
Concentración de cromo (ppm)	ICP
Concentración de cadmio (ppm)	ICP
Concentración de bario (ppm)	ICP
Concentración de mercurio (ppm)	ICP
Concentración de plomo (ppm)	ICP

Retorno del material tratado: Esta actividad estaba estrechamente relacionada con los resultados de los análisis de TPH entregados, permitiendo el retorno del material al área estanca una vez alcanzado un TPH inferior al 2%.

La construcción del filtro natural conllevó a una disminución del volumen total excavado, razón por la cual el volumen final de suelo remediado retornado fue de 1361 m³, manteniendo de esta forma la capacidad del área estanca del tanque de almacenamiento. Las actividades correspondientes a la construcción del filtro se evidencian en las Figuras 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 y 3.29.



Figura 3.25.: Actividad de retorno de material tratado.



Figura 3.26.: Actividad de retorno material tratado.



Figura 3.27.: Actividad de retorno de material tratado.



Figura 3.28.: Actividad de retorno material tratado.



Figura 3.29.: Vista área del área estanca terminada.

3.3 RESULTADOS

La construcción del filtro natural contribuyó fundamentalmente al aislamiento de la napa freática, la cual como se pudo evidenciar durante las primeras etapas de trabajo de ingeniería, se encontraba contaminada con productos líquidos hidrocarbonados.

Efectivamente, en el lugar en donde se desarrolló el presente proyecto posee un sistema de tuberías y tanques de almacenamiento que a través del tiempo pudieron presentar averías, que se tradujeron en derrames de los productos refinados que allí se trabajan conllevando a la contaminación del suelo, y dependiendo de la severidad del daño, de la napa freática. Con el aislamiento de la napa freática se evitó que las aguas subterráneas contaminadas lleguen a la superficie y contaminen el suelo remediado que se dispuso sobre la geomembrana, de igual forma se evitó que en el posible caso de presentarse un derrame en el interior del área estanca, éste afecte la napa freática incrementando su nivel de contaminación.

El suelo, el cual constituye el elemento receptor, por excelencia, de la contaminación, constituye una problemática evidente en el lugar de ejecución del proyecto. Para este caso, en específico, el suelo fue remediado bajo condiciones *ex situ*; proceso que fue evaluado mediante la valoración de los diferentes parámetros relacionados en el Tabla 3.6 durante el tiempo de tratamiento. Por lo tanto se evita la contaminación futura por contacto de líquidos hidrocarbonados de la napa freática.

Tabla 3.6. Evolución de parámetros durante el tiempo de tratamiento del proyecto

PARAMETRO EVALUADO	DIA DE TRATAMIENTO						
	1*	22	57	84	101	124	144
pH	7,03	6,52	7,78	7,49	6,55	6,79	6,16
Cloruros (ppm)	3689	4192	7018	7954	10452	7119	12456
Nitrógeno (ppm)	773	674	614	1273	971	1343	104
Potasio (ppm)	916	172	2173	2554	1787	1944	1892
Fósforo (ppm)	30	90	92	127	319	297	85,9
Humedad (%)	6,03	9,20	9,63	10,31	10,17	9,18	6,98
Materia orgánica (%)	12,57	6,90	8,27	6,47	5,83	6,43	5,22
TPH (%)	8,49	4,56	4,62	3,49	2,20	1,75	1,10
Recuento total microbiano (ufc/g)	1x10 ⁶	1x10 ⁴	9x10 ⁴	1x10 ⁴	9x10 ⁵	2x10 ⁶	3x10 ⁶
Recuento población degradadora (ufc/g)	2x10 ⁴	2x10 ²	2x10 ²	3x10 ²	7x10 ⁵	9x10 ⁵	1x10 ⁶

* Línea base

Tabla 3.7 Variación de los metales pesados presentes en el suelo de tratamiento proveniente del área estanca del tanque de almacenamiento.

Elemento (ppm)	Día 1	Día 22	Día 57	Día 84	Día 101	Día 124	Día 144
Plomo	140	170	64	89	10	11	56
Cadmio	0,36	0,23	0,36	0,47	1,06	0,91	0,65
Bario	42	24	30	29	8	10	25
Cromo	16	15	13	15	10,4	10,3	10
Mercurio	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

3.4 INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el momento en el cual se desarrollo el presente trabajo, en la legislación ambiental del Perú no contemplaba reglamento alguno con respecto a los ECA ó los LMP para suelos en lo referente al sub sector hidrocarburos o cualquier otra área industrial.

En respuesta de lo anterior, el valor de limpieza del suelo a tratar fue establecido de común acuerdo entre la empresa generadora de la contaminación y la empresa prestadora de los servicios ambientales. De hecho, en muchos países en donde no se cuenta con una normativa ambiental especifica como consecuencia de la falta de uniformidad de criterios por parte de las entidades encargadas de establecer los límites permisibles de limpieza se buscan mecanismos a través de los cuales se determinen dichos niveles. Uno de estos mecanismos está basado en la evaluación de criterios de referencia como la peligrosidad de la contaminación y el tipo de exposición. Por ejemplo, el benceno es indicador de contaminación con gasolinas porque tiene características de persistencia, bioacumulidad y riesgo a la salud humana; de manera similar el naftaleno se utiliza como parámetro indicador de contaminación con diesel (17).

En otros casos se manejan estándares oficiales extranjeros, pero para aplicarlos a la realidad de cada situación es conveniente conocer la base del razonamiento que conllevó a estos índices con la finalidad de tener los parámetros que permitan definir su aplicabilidad (17).

Una vez establecido el límite de limpieza ($TPH < 2 \%$) se analizan los factores determinantes en el proceso de biorremediación implementado para el tratamiento del suelo contaminado con hidrocarburos.

Todos los organismos vivos deben garantizar tres funciones vitales para determinar su presencia y estabilidad en un determinado ecosistema: crecimiento, mantenimiento y reproducción. Las bacterias heterótrofas no ajenas a esta necesidad deben obtener el alimento suficiente del medio que los rodea para cumplir con las funciones básicas descritas anteriormente. Estos elementos deben encontrarse en las concentraciones y proporciones adecuadas para favorecer el crecimiento bacteriano, cualquier exceso o deficiencia puede alterar dramáticamente su desarrollo (33, 39).

Inicialmente se hará un análisis de la evolución de estos elementos nutricionales, los cuales fueron proveídos principalmente a lo largo de la implementación de la técnica de *landfarming* en el suelo contaminado removido del área estanca del tanque de almacenamiento.

3.4.1 FUENTE DE CARBONO

La fuente de carbono fue suministrada en mayor proporción por los hidrocarburos presentes en el suelo (37), y en menor proporción por el estiércol vacuno. A lo largo del primer mes de tratamiento, se evidenció una reducción del porcentaje de hidrocarburos totales del orden del 43%, en repuesta, posiblemente, a procesos de volatilización de hidrocarburos saturados de bajo peso molecular así como por el proceso de homogenización durante las actividades de reubicación del material en la zona aledaña.

Efectivamente, tal y como se puede apreciar en las Figuras 3.1 y 3.2, en el estado de referencia, el grado de contaminación variaba de un lugar a otro dentro de la misma área estanca así como a diferentes profundidades.

El valor de TPH registrado a los 57 días de iniciado el proyecto indica que éste era de 4,62%, sugiriendo que las condiciones eran las apropiadas para dar inicio al proceso de biorremediación (Figura 3.31), ya que una saturación de compuestos hidrocarbonados (concentraciones superiores a 8%) traería como consecuencia una reducción de la cinética de degradación, llegando en algunos casos a inhibir el crecimiento de la población microbiana degradadora (40, 41, 42).

Los microorganismos aislados corresponden a los tipos y géneros bacterianos conocidos y reportados por su habilidad para degradar hidrocarburos en climas tropicales (27).

Durante la implementación de la técnica de *landfarming*, en lo referente al TPH, y antes de la primera aplicación del caldo bacteriano (día 85) no se registraron variaciones significativas. De hecho, la reducción que se presentó se puede ser el resultado de la bioestimulación generada durante la oxigenación del terreno mas que debido a la volatilización de hidrocarburos (43). Sin embargo, desde la aplicación del caldo y hasta la finalización del período de monitoreo, el TPH se redujo en un 50% hasta llegar a valores por debajo del rango propuesto al inicio del proyecto (< 2%).

La disminución de las fuentes de carbono propias del suelo generó el consumo del hidrocarburo, lo cual ocasionó el incremento de los microorganismos degradadores de hidrocarburos (12).

La variación de este factor se correlacionó con el del recuento total de la población bacteriana heterótrofa, la cual se incrementó 9 veces con respecto a la concentración de referencia en respuesta a la bioestimulación del suelo generado durante las actividades propias del *landfarming* (41). Posterior a la aplicación del caldo bacteriano, la carga poblacional total se mantuvo en 10^6 ufc/g suelo (Figura 3.30).

La densidad poblacional de los microorganismos degradadores depende de las relaciones C:N presentes en el suelo, cuando dichas relaciones son altas las tasas de mineralización son bajas y cuando estas relaciones son bajas las tasas de mineralización son altas, lo cual se evidencia en la concentración de TPH (12).

Como lo muestra la Tabla 3.3 el grupo bacteriano identificado como *Pseudomonas* juega un papel importante en suelos deficientes de nitrógeno debido a que representa una comunidad microbiana nitrificante con alta afinidad por el amonio que ayuda a mantener el nitrógeno disponible en el suelo favoreciendo el proceso de degradación (28).

Adicionalmente las bacterias de este género poseen la habilidad para utilizar diversos sustratos derivados del petróleo. Por su parte, *P. aeruginosa* tiene la capacidad de sintetizar ramnolípidos cuando se encuentra en la fase estacionaria de su crecimiento, por tal razón en la primera fase del proceso de biorremediación los contaminantes son inmovilizados y solubilizados facilitando el proceso de mineralización (20).

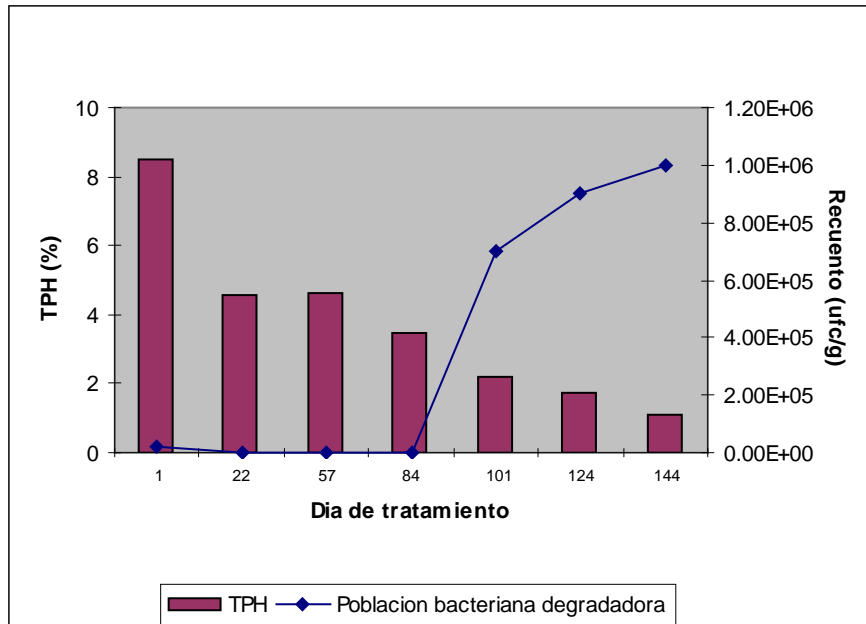


Figura 3.30.: Variación del TPH y del recuento de la población microbiana total durante el proceso de biodegradación de hidrocarburos en el suelo contaminado proveniente del área estanca del tanque de almacenamiento.

No obstante, la variación más notable se presentó a nivel de las poblaciones microbianas degradadoras en donde se evidenció un incremento exponencial del orden de 10^4 , lo anterior, en consecuencia a las aplicaciones de caldos bacterianos favoreciendo un bioaumentación de un grupo microbiano específico previamente seleccionado y evaluado a nivel de laboratorio conllevando a una optimización en la descomposición de hidrocarburos (40, 42) (Figura 3.31).

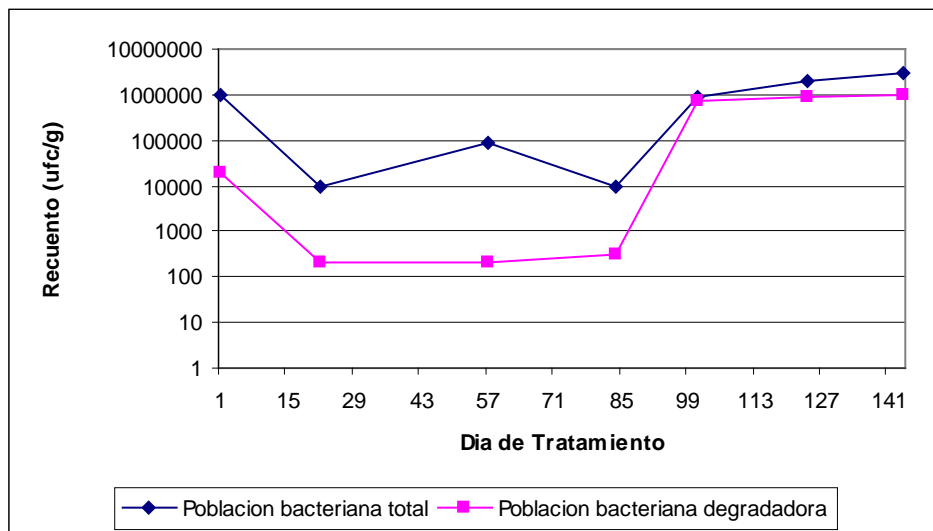


Figura 3.31.: Correlación entre poblaciones microbianas totales y poblaciones microbianas degradadoras durante el proceso de biorremediación en el suelo contaminado proveniente del área estanca del tanque de almacenamiento.

La actividad metabólica bacteriana conllevó a un declive en los valores de las variables orgánicas (TPH y materia orgánica) afectando el pH tal y como se muestra en la Tabla 3.7 (42). Como se constata al finalizar el tiempo de ejecución del proyecto se registraba aún la

presencia de hidrocarburos; lo anterior no significa que los restos de productos contaminantes permanezcan indefinidamente en el ambiente. Por el contrario, con el bioaumentación generado, la población degradadora se mantendrá activa siempre y cuando se le brinden las condiciones necesarias para asegurar la mineralización de los contaminantes.

3.4.2 FUENTE DE NITRÓGENO

Luego del carbono, el elemento de mayor importancia es el nitrógeno. De hecho, del 12 al 15% del peso seco microbiano corresponde a este macroelemento (41). En la naturaleza, éste puede encontrarse tanto en forma orgánica como inorgánica.

Dentro de las formas orgánicas del nitrógeno se encuentra la urea. La urea es eficaz como fuente de nitrógeno solamente cuando la mayoría de los microorganismos definidos como degradadores son productores de la enzima ureasa. La experiencia ha demostrado que gran parte del amoníaco se puede oxidar hasta nitrato y/o nitrito mediante una mezcla vigorosa y frecuente del suelo. Por otra parte, la presencia de bacterias nitrificadoras actuaría sobre el amoníaco convirtiéndolo en una forma más oxidada de nitrógeno permitiendo su aprovechamiento por parte de los microorganismos degradadores.

En lo referente a los microorganismos degradadores del suelo proveniente del área estanca del tanque de almacenamiento, el 30% de las bacterias aisladas pertenecen al género *Pseudomonas* spp, las cuales se caracterizan por presentar un metabolismo denitrificador favoreciendo así el proceso de biodegradación de hidrocarburos. Adicionalmente, como se evidenció anteriormente se registró una actividad metabólica reflejada en la reducción del TPH y materia orgánica lo cual indica un consumo de nitrógeno en forma oxidada.

Como lo indica la Tabla 3.6 y en la Figura 3.32, la concentración de nitrógeno al inicio del proyecto fue baja corroborando los datos históricos registrados para las tierras de protección.

Con la adición de la urea y del fertilizante agrícola tipo triple 20, antes de la aplicación del caldo bacteriano, se duplicó la concentración de este nutriente alcanzando los niveles requeridos para optimizar el desarrollo bacteriano para este caso en particular. Después de la inoculación de la mezcla degradadora se registraron fluctuaciones en su concentración, para finalmente detectar un descenso drástico en respuesta a la actividad metabólica.

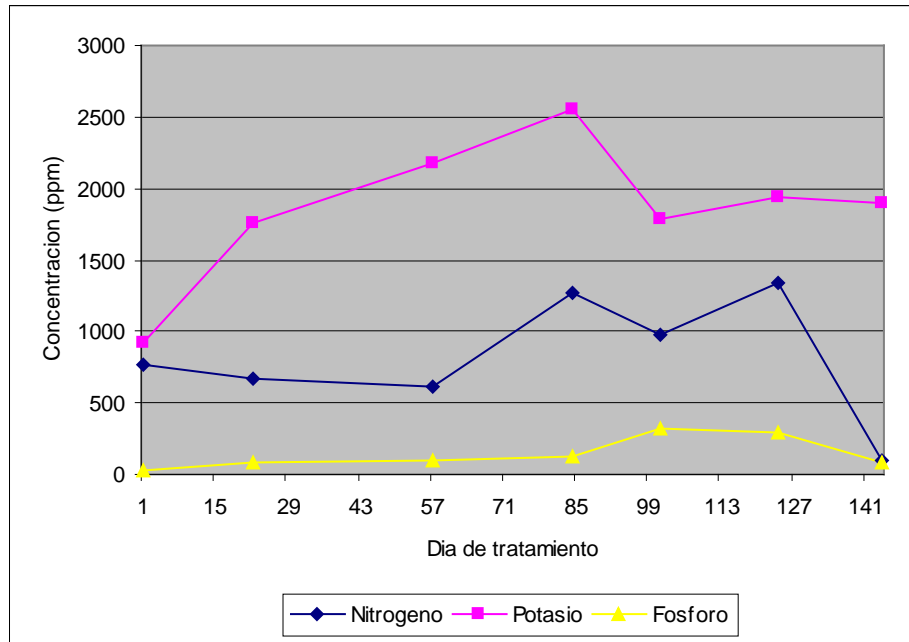


Figura 3.32.: Variación de macro y microelementos durante el proceso de biodegradación en el suelo contaminado proveniente del área estanca del tanque de almacenamiento.

3.4.3 MICRONUTRIENTES

Tal y como lo muestra la Tabla 3.6 y en la Figura 3.32, tanto el fósforo como el potasio registraron un incremento (aplicación de fertilizantes agrícolas) seguido por una disminución y posterior estabilidad de su concentración en el suelo, mostrando evidencia del proceso de biodegradación (40, 41, 42).

Si bien, las condiciones nutricionales son necesarias para favorecer y optimizar el crecimiento bacteriano, es importante indicar qué otros factores deben ser analizados debido a su importancia en el proceso de biodegradación de hidrocarburos (42).

3.4.4 HUMEDAD

El porcentaje de humedad que se registró al inicio del proyecto fue bajo, no obstante con el fin de favorecer el crecimiento bacteriano, se buscó mantener este porcentaje entre un rango de 10% a 15%, registrando a lo largo del tratamiento un porcentaje promedio de 10. Cabe recalcar que el tipo de suelo tratado era de tipo arcilloso, lo cual benefició la retención de agua y por ende el proceso mismo (41, 42).

3.4.5 CLORUROS

Debido a la cercanía del mar y a las características propias del terreno, la salinidad es una variable importante que influye de manera negativa en el proceso de biorremediación (31). Para el caso del presente proyecto, el 66,5% de las cepas aisladas pertenecen a especies del género *Micrococcus* spp, y donde una de sus características fisiológicas es la de

desarrollarse adecuadamente en medios que contengan concentraciones de sal por encima del 5%, sugiriendo que su halotolerancia determinó una particularidad importante en la selección del pool degradador.

3.4.6 METALES PESADOS

Los metales pesados constituyen una serie de elementos que se encuentran comúnmente en la naturaleza y cuya densidad es igual o superior a 5g/cm^3 cuando está en forma elemental. Durante la etapa de refinación y producción de crudo, varios de estos elementos son incorporados a dichos productos en forma de sales incorporándose a su estructura molecular o como catalizadores para permitir su producción y/o manteniendo su estabilidad (31).

En las muestras de suelo analizadas, se determinó la presencia y concentración de 05 oligoelementos reseñados en la Tabla 3.5. La variación en la concentración de éstos durante la ejecución del proyecto se registra en la Tabla 3.7 y en la Figura 3.33.

Como se puede observar en las Tablas 3.7 y 3.8, el único elemento que no fue detectado durante la ejecución del proyecto fue el mercurio, no obstante lo anterior no sugiere que este elemento no se encuentre en el suelo ya que éste pudo estar presente en bajas concentraciones, por debajo del límite de detección del método utilizado (ICP) ($< 0,01$ ppm).

Es importante tener en cuenta que debido a su naturaleza, los metales pesados no se pueden degradar por acción biótica o abiótica, y en consecuencia sus concentraciones no varían en el tiempo (31). Por esta razón, las concentraciones de estos elementos fueron constantes y no se registraron disminuciones o aumentos significativos que indicaran un proceso de eliminación. Con respecto al estado de referencia, y una vez homogenizado el suelo, es notoria la disminución registrada para el caso del plomo, no obstante éste no es el resultado de una eliminación y/o degradación del elemento en el ecosistema sino que obedece al proceso de dilución; lo cual se puede afirmar si se considera que los análisis para este parámetro fueron realizados por laboratorios especializados siguiendo metodologías certificadas. De igual manera, cabe recalcar que el contenido de metales pesados se mantuvo dentro de las concentraciones permisibles para suelos reportadas en la “Guía Ambiental para la disposición de desechos de perforación en la actividad petrolera” Vol X emitido por el Ministerio de Energía y Minas, los cuales se encuentran relacionados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Concentraciones normales de metales en suelos.

Elemento	Concentración normal de elemento en suelo Datos a nivel mundial (mg/Kg)
Bario	100- 1500
Cadmio	0,01-1
Cromo	2- 300
Mercurio	0,005- 0,5
Plomo	5- 70

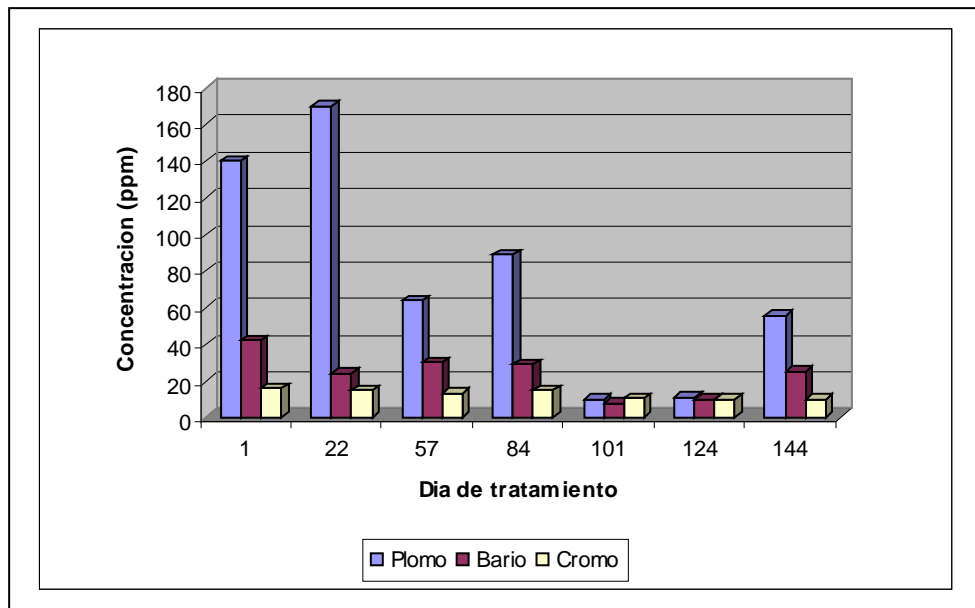


Figura 3.33.: Variación de la concentración de plomo, bario y cromo presentes en el suelo tratado en el área estanca del tanque de almacenamiento.

3.5 CONCLUSIONES

Al implementar esta técnica se integraron varias disciplinas que, mediante una metodología planificada, permitieron por un lado, alcanzar niveles de recuperación del suelo hasta porcentajes por debajo del 2% de TPH, lo cual permite su acondicionamiento para fines industriales y/o comerciales, y por otro lado, el aislamiento de la napa freática impidiendo que sea contaminada por alguna contingencia futura dentro del área estanca del tanque de almacenamiento en estudio y/o del suelo recuperado.

A diferencia de otras técnicas utilizadas para la recuperación de suelos contaminados, la biorremediación garantiza la reducción y hasta la eliminación del contaminante presente en el ambiente mediante el proceso de mineralización.

Si bien se sabe que para llevar a cabo el tratamiento de áreas contaminadas con hidrocarburos se debe incurrir en costos de ejecución del proyecto que para las compañías operadoras son onerosos, la importancia de mantener un medio ambiente debe considerarse prioritario aun por encima de los intereses económicos.

El proceso de biorremediación involucra metodologías fundamentadas en investigaciones científicas y en ingeniería, exigiendo un compromiso profesional permanente. Su implementación exige tener la convicción que los costos ocasionados van acompañados de los beneficios ambientales alcanzados, y que además los costos pueden ser optimizados con técnicas muy ventajosas, como fue la construcción del filtro natural.

Actividades en el campo de la ingeniería como la topografía, la mecánica de suelos y el dibujo arquitectónico han sido utilizadas en este proyecto con un enfoque ambiental con el fin de optimizar las condiciones necesarias para el desarrollo de la fase biotecnológica.

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha verificado la efectividad de la técnica de *landfarming*, para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
- ✓ El proceso de remediación que involucró la aplicación combinada de *landfarming* y biodegradación se optimizó mediante el desarrollo biotecnológico involucrando el aislamiento y selección de cepas bacterianas degradadoras del contaminante.
- ✓ La eficiencia del proceso de *landfarming* aumenta cuando es aplicada a suelos arenosos. Esto se debe a que el proceso de aireación es favorecido en este tipo de suelos; adicionalmente, el transporte de nutrientes -a través de la humectación del suelo- también se ve favorecido.
- ✓ Se confirmó que esta técnica es más eficiente cuando los hidrocarburos son más livianos o de cadenas más cortas.
- ✓ La optimización de la técnica de *landfarming* se alcanzó al utilizar como herramienta la ingeniería, para crear las facilidades de infraestructura necesarias en las diferentes etapas del proceso.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la impermeabilización de las áreas de almacenamiento de hidrocarburos con geomembrana y no con concreto ya que la contaminación del mismo con los hidrocarburos lo transformaría en un residuo sólido peligroso, acentuando la problemática ambiental.
- ✓ Se recomienda establecer la línea base para cada suelo que se quiera remediar con el objetivo de seleccionar la técnica de remediación a implementar asegurando la eficacia de la misma.

BIBLIOGRAFIA

1. **Dorronsoro, C.; García, I.** Introducción a la Edafología. Tema 1 a 5. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada. España. Disponible en <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema00/progr.htm>
2. **Alexander, M.** Introduction to soil microbiology. Krieger Pub. Co. 2nd edition 1991.
3. **Luna, M. L.; Vega, C.; Franco, M. O.; Vásquez, S.; Trujillo, N.; Ramírez, E.; Dendooven, L.** Actividades microbianas en suelos, avances y perspectivas. Vol. 21. Pág. 328-332. 2002.
4. **Jordana, R.** Ecología y aspectos funcionales de la biodiversidad en el suelo. Agricultura ecológica y desarrollo rural. Memorias II Congreso de la Sociedad Española de Agricultura ecológica. Pamplona – Iruña. Pág. 225-240. 1996.
5. **Das, B. M.** Principios de ingeniería en cimentaciones. International Thomson Editores. Cuarta edición. México. 2001.
6. **Gallardo, G.** Apuntes de mecánica de suelo I. Universidad de Piura. Piura- Perú. 1994.
7. **Brack, A.; Mendiola, C.** Ecología del Perú- Estudio Nacional de la Diversidad Biológica - DGANPE - INRENA. 1997.
8. **Quiminet.com.** El análisis de suelos. Publicado Febrero 2006. Disponible en http://www.quiminet.com/ar7/ar_%259A%25E1%257E%25A2b%2524%25B4%25C8.htm

9. **Williams, S. T.; Gray, T. R. G.** Decomposition of litter on soil surface en *Biology of litter decomposition*, Vol. II C.H. Dickinson & G.J.E. Pugh. Ed. Nueva York. Academic Press. 1974
10. **Hillel, D.** *Introduction to soil physic*. Academia Press. U.S.A. 1982
11. **Paul, E.A.; Clark, F.E.** *Soil microbiology and biochemistry*. California. American Press. U.S.A. 1989.
12. **Pardo, J. L.; Perdomo, M.C.; Benavides López de Mesa, J. L.** Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo. NOVA- Publicación científica. Vol 2(2). Pág. 40-49. 2004.
13. **PERUPETRO**. Disponible en <http://mirror.perupetro.com.pe/camisea01-s.asp>
14. **Sociedad Nacional de MINERÍA PETRÓLEO Y ENERGÍA**. Los hidrocarburos. Informe quincenal de la snmpe N°. 44. Diciembre II- 2006.
15. **Ministerio de Energía y Minas**. Sector hidrocarburos. Disponible en www.minem.gob.pe
16. **García, I.** Contaminación del suelo e impacto ambiental. Tema 10 a 19. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada. España. Disponible en <http://edafologia.ugr.es/conta/tema00/progr.htm>
17. **Saval Bohórquez, S.** Aspectos técnicos: Remediación y restauración. PEMEX ambiente y energía. Los retos del futuro. Pág. 209-235. México 1995
18. **Lopolito, M.F.; Molina, L.; Corbella, M.; Cavas, S.; García, E.; Lanfranchi, D.; Gómez, C.; Higa, L.** Biodegradación de hidrocarburos de petróleo y compuestos relacionados. Disponible en <http://www.ingenieroambiental.com/info/biohidro.pdf>
19. **United States Environmental Protection Agency**. How to affectively free product at leaking underground storage tank sites: A guide for states regulators. E.P.A. 510-R-96-001. Chapter III. Setiembre 1996.
20. **Benavides López de Mesa, J.; Quintero, G.; Guevara, A. L.; Jaimes, D. C.; Gutiérrez, S. M.; Miranda, J.** Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. NOVA- Publicación científica. Vol 4 (5). Pág 82-90. 2006.
21. **Brañez, R.** Informe sobre el derecho ambiental latinoamericano, su aplicación después de diez años de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (P.N.U.M.A.). Oficina Regional para América Latina y el Caribe. México. 2001.
22. **Constitución Política del Perú**. Promulgada en 1993.
23. **Fernández, M.** Glosario de términos minero energéticos y ambientales de la legislación peruana. Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. Perú. 2003.

24. **Maroto, M.E.; Rogel, J.M.** Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. Geocisa. División Ambiental de suelos. Disponible en http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/con_recu_acuiferos/028.pdf
25. **Van Cauwenberghe, L.; Roote, D.** In situ Bioremediation. Technology Overview Report TO-98-01. GWRTAC. 1998.
26. **Álvarez, J. A.; Díaz, M. A.** Alternativas para la remediación de ecosistemas contaminados por hidrocarburos. Centro de Investigación del Petróleo. Cuba. 2001.
27. **Adams, R. H.; Domínguez, V. I.; García, L.** Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Terra. Vol 17 (2). Pág. 159-174. 1999.
28. **Acuña, A.J.; Pucci, O.H.; Pucci, G.N.** Caracterización de un proceso de biorremediación de hidrocarburos en deficiencia de nitrógeno en un suelo de Patagonia Argentina. Ecosistemas. Vol 17 (2). Pág. 85- 93. 2008.
29. **Walter, M.V.; Crawford, R.** Biotransformation and Biodegradation. En Manual of Environmental Microbiology. Capítulo 76 de Biotransformation and Biodegradation. American Society for Microbiology. Washington D.C. 1997
30. **United States Environmental Protection Agency.** A citizen's guide to bioremediation. EPA 542-F-01-001. Abril 2001.
31. **Ercoli, E.; Gálvez, J.; Di Paola, M.; Cantero, J.; Videla, S.; Medaura, M.; Bauza, J.** Análisis y evaluación de parámetros críticos en biodegradación de hidrocarburos en suelo. En Congreso Producción 2000. III Workshop Latinoamericano sobre aplicaciones de la ciencia de la Ingeniería de Petróleo. Puerto Iguazú- Argentina. Formato electrónico. 2000.
32. **Bossert, I.D.; D.S., Kosson.** Methods for measuring hydrocarbon biodegradation in soils. En Manual of Environmental Microbiology. Cap 80 de Biotransformations and Biodegradation. American Society for Microbiology. Washington D.C. 1997.
33. **Saracino, C.; Ercoli, E.; Gálvez, J.; Videla, O.** Evaluación de dos años de experiencias de campo en biorremediación de suelos. En Tercera Jornada de Preservación de agua, aire y suelo en la industria de petróleo y del gas. Instituto Argentino del petróleo. Comodora- Rivadavia- Argentina. Tomo 1. Pág. 47-60. 1998.
34. **Walter, M.V.** Biotransformation. En Manual of Environmental Microbiology. Capítulo 82 de Biotransformation and biodegradation. American Society for Microbiology. Washington D.C. 1997.
35. **Richard, P.; Swannell, J.; Head, I.** Bioremediation comes of age. Nature. Vol 368 (31). 1994.

36. **Harding, G.L.**; Bioremediation and the dissimilatory reduction of metals. En Manual of Environmental Microbiology. Capítulo 89 de Biotransformation and Biodegradation. American Society for Microbiology. Washington D.C. 1997.
37. **Martínez, V.; López,** Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcillosos. Terra. Vol 19 (1). 2001.
38. **Sociedad Nacional de MINERÍA PETRÓLEO Y ENERGÍA.** Los estándares de calidad ambiental y los límites máximos permisibles. Informe quincenal de la snmpe N°. 73. Octubre IV- 2008.
39. **D.S. 008-2005-PCM,** Reglamento de la Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental.
40. **Curci, E.; Calleja, C.; Videla, S.; Gálvez, J.; Ercoli, E.** Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Ingepet 99- Lima Perú. Formato electrónico. 1999.
41. **Ercoli, E.; Gálvez, J.; Aranzadi, E.; Di Paola, M.** Experiencia en biorremediación de suelos en el centro- oeste argentino. Información tecnológica. Vol 9 (4) CIT. La Serena- Chile. 1998.
42. **Ercoli, E.; Gálvez, J.; Di Paola, M.; Cantero, J.; Videla, S.; Medaura, C.** Biorremediación de suelos altamente contaminados. Ingepet 99. Lima- Perú. Formato electrónico. 1999.
43. **Ercoli, E.; Fuentes, B.J.; Gilobert, M.; Gálvez, J.; Arreghini, M.** Tratamiento biológico de lodos de Refinería. En II Simposio de producción de hidrocarburos. Instituto Argentino del Petróleo. Mendoza- Argentina. Tomo 1. Pág. 497-506. 1995.