



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

**“TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS APLICABLES EN EL
CANTÓN SALINAS”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERÍA EN PETRÓLEO

AUTORA:

KAREN ROCÍO YAGUAL BARZOLA

TUTOR:

LIC. ANTONIO MORATO MEDINA, MSC.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2020

**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO**

**“TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS APLICABLES EN EL
CANTÓN SALINAS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

INGENIERÍA EN PETRÓLEO

AUTORA:

KAREN ROCÍO YAGUAL BARZOLA

TUTOR:

LIC. ANTONIO MORATO MEDINA, MSC.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE TESIS

Yo, **Yagual Barzola Karen Rocío**, con cedula de ciudadanía 0921643946, declaro bajo juramento que el presente Trabajo de Investigación es de mi autoría, mismo que no ha sido presentado para ningún grado o calificación profesional y haber realizado las consultas en las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Por medio de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual sobre este trabajo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y la normativa institucional vigente.

Atentamente,

Karen Yagual B.

Yagual Barzola Karen Rocío

CI: 0921643946

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

En mi calidad de tutor de la tesis: “TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS APLICABLES EN EL CANTÓN SALINAS” desarrollada por la Srta. KAREN ROCIO YAGUAL BARZOLA egresada de la Carrera de Ingeniería en Petróleo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del Título de Ingeniera en Petróleo.

Me permito declarar que luego de haber dirigido, estudiado y revisado, apruebo en su totalidad este trabajo de investigación.

ATENTAMENTE



Lcdo. Antonio Morato Medina, MsC

C.I 0960780443

DOCENTE TUTOR

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

ROCÍO ALEXANDRA BARZOLA MEREJILDO
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGISTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS
EDUCATIVOS

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

A petición de la interesada tengo a bien certificar que he realizado la revisión y el análisis del contenido del presente trabajo de titulación con el tema:

“TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS APLICABLES EN EL CANTÓN SALINAS”, de la egresada **YAGUAL BARZOLA KAREN ROCÍO** con cédula N° **0921643946**, de la Carrera de **Ingeniería en Petróleo** de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Que el mencionado trabajo, en el contexto general, cumple con los requisitos lingüísticos dados por la Real Academia Española, para fines académicos respectivos.

Certifica,



Lic. Rocío Alexandra Barzola Merejildo, MSc

C.I: 0910105840

Telf: 0960946278

Correo: rocioabm1@hotmail.com

Registro de Senescyt 1006-10-976265

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

001-AMM-2020

En mi calidad de tutor del trabajo de titulación denominado: “TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS APLICABLES EN EL CANTÓN SALINAS” elaborado por la estudiante KAREN ROCIO YAGUAL BARZOLA egresada de la Carrera de Ingeniería en Petróleo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del Título de Ingeniera en Petróleo, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido los requerimientos exigidos de valoración, el presente proyecto ejecutado, se encuentra con 9% de valoración, por lo que se procede a emitir el presente informe.

ATENTAMENTE



Lcdo. Antonio Morato Medina, MsC

C.I 0960780443

DOCENTE TUTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres **Francisco Yagual** y **Roció Barzola** quienes son los pilares fundamentales en mi vida, por brindarme su apoyo, inculcarme valores, disciplina y por ser perseverante en todo el transcurso de mi carrera universitaria.

A mi hermana **Judith Yagual** y mi sobrina **Maydeline** por su apoyo incondicional y ser mi fuente de inspiración y superación.

A toda mi familia le dedico este logro importante en mi vida, quienes deben estar orgullosos de mí por alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

A **Dios** por brindarme vida, salud, sabiduría y perseverancia para culminar con éxito este objetivo anhelado.

En especial a mis padres, **Rocío Barzola** que con su demostración de superación me ha enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y ser perseverante. A mi padre **Francisco Yagual** por enseñarme cada día que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue.

A mi hermana **Judith Yagual** quien con sus palabras de aliento no me dejaba decaer y así poder seguir adelante y cumpla con este logro.

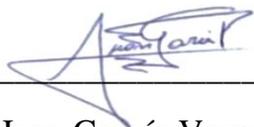
A mi tutor **Lic. Antonio Morato** por su motivación, paciencia y conocimiento impartido que me supo guiar para terminar mi trabajo de investigación.

Al **Ing. Daniel Ponce De León, PhD** por compartir sus conocimientos y permitir el uso del laboratorio de suelo y agua para el desarrollo de mi trabajo de titulación.

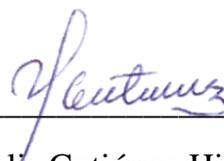
A **mis amigos** por su constante apoyo moral que en los momentos más difíciles me motivaron a continuar y a todas las personas que de una u otro modo me ayudaron en la realización de este trabajo.

Finalmente agradezco a la **Universidad Estatal Península de Santa Elena**, por abrirnos las puertas a jóvenes para formarnos como profesionales y a los **profesores** por sus sabios consejos y conocimientos que nos impartieron a lo largo de nuestra carrera profesional.

TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Juan Garcés Vargas, Mgt.
DECANO DE LA FACULTAD
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA



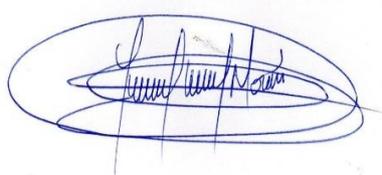
Ing. Marllelis Gutiérrez Hinestroza, PhD.
DIRECTORA DE LA CARRERA
INGENIERÍA EN PETRÓLEOS



Lcda. Erica Lorenzo García, PhD.
PROFESORA DE ARÉA



Lcdo. Antonio Morato Medina, MsC.
PROFESOR DE TUTOR



Ab. Lidia Villamar Morán, Mgt
SECRETARIA GENERAL (E)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE TESIS	III
CERTIFICACIÓN DE TUTOR	III
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	V
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	VI
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTO	VIII
TRIBUNAL DE GRADO	IX
ÍNDICE DE CONTENIDOS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIX
ÍNDICE DE ANEXOS	XX
RESUMEN	XXI
ABSTRACT	XXII
INTRODUCCIÓN	XXIII
CAPÍTULO I	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	
2.1 SUELO	5
2.1.1 Formación del suelo.....	6
2.1.2 Composición del suelo.....	7
	X

2.1.3	Perfil y horizontes del suelo	7
2.1.4	Propiedades físicas y químicas del suelo.....	9
2.1.4.1	Propiedades físicas del suelo	9
2.1.4.1.1	Textura del suelo	9
2.1.4.1.2	Estructura del suelo	11
2.1.4.2	Propiedades químicas del suelo	11
2.1.4.2.1	La humedad del suelo.....	11
2.1.4.2.2	El pH del suelo	13
2.1.4.2.3	Salinidad del suelo	13
2.2	EL PETRÓLEO	13
2.2.1	Definición	13
2.2.2	Composición de los hidrocarburos	13
2.2.3	Composición por familias de hidrocarburos.....	15
2.2.3.1	Parafinas volátiles (n-alcanos e isoprenoides volátiles).....	15
2.2.3.2	Parafinas no volátiles (n-alcanos e isoprenoides)	15
2.2.3.3	Naftenos (cicloalcanos).....	15
2.2.3.4	Oleofinas (alquenos)	15
2.2.3.5	Aromáticos	15
2.2.4	Clasificación del petróleo según su Gravedad API	16
2.3	CONTAMINACIÓN DEL SUELO	17
2.4	CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR HIDROCARBUROS	17
2.4.1	Fuentes de generación de contaminación del suelo con hidrocarburos.....	18
2.4.2	Clasificación de las fuentes de contaminación de acuerdo al origen	19
2.4.3	Efecto contaminante de la industria petrolera en el suelo	19
2.4.4	Criterios de selección del método de recuperación de un suelo contaminado	20

2.5	RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	20
2.5.1	DEFINICIÓN DE TÉCNICAS DE CONFINAMIENTO.....	22
2.5.1.1	PROCESOS FÍSICOS - QUÍMICOS	22
2.5.1.1.1	Estabilización físico- química	22
2.5.1.1.2	Inyección de solidificantes	24
2.5.1.2	PROCESOS TÉRMICOS	24
2.5.1.2.1	Vitrificación	24
2.5.2	DEFINICIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO	26
2.5.2.1	TÉCNICAS DE TRATAMIENTO IN SITU.....	26
2.5.2.1.1	TRATAMIENTOS FISICO - QUÍMICOS	27
2.5.2.1.1.1	Extracción de vapores del suelo (SVE)	27
2.5.2.1.1.2	Enjuague de suelos	29
2.5.2.1.2	TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.....	30
2.5.2.1.2.1	Biorremediación	30
2.5.2.1.2.1.1	Biorremediación In Situ.....	32
2.5.2.1.2.1.1.1	Bioventeo o Bioaireación In Situ del suelo	33
2.5.2.1.2.1.1.2	Biosparging.....	36
2.5.2.1.2.2	Fitorremediación.....	37
2.5.2.1.3	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	40
2.5.2.1.3.1	Arrastre con vapor de agua o aire caliente	40
2.5.2.1.3.2	Vaporización mediante calentamiento.....	41
2.5.2.2.1	TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS EX SITU.....	43
2.5.2.2.1.1	Lavado del suelo	43
2.5.2.2.1.2	Extracción química	44

2.5.2.2.1.3	Tratamientos Redox.....	45
2.5.2.2.2	TRATAMIENTOS TÉRMICOS EX SITU	45
2.5.2.2.2.1	Desorción térmica.....	45
2.5.2.2.3	TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.....	46
2.5.2.2.3.1	Landfarming	46
2.5.2.2.3.2	Biopilas.....	47
2.5.2.2.3.3	Compostaje	49
2.5.3	TÉCNICAS DE PUESTA EN CONTACTO	50
2.5.3.2	Kerfing	50
2.5.4	TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN Y DEPÓSITO FINAL.....	50
2.5.5	ATENUACIÓN NATURAL.....	51

CAPÍTULO III 53

METODOLOGÍA: DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA Y EXTRACCIÓN DEL CRUDO DEL SUELO 53

3.1 UBICACIÓN 53

3.1.1	Zona 1 - Sector Valparaíso	54
3.1.2	Zona 2 - Sector Costa de Oro	55
3.1.3	Zona 3 - Sector Santa Rosa.....	56

3.2 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA TEXTURA DEL SUELO 57

3.2.1	Determinación de la textura del suelo mediante el método del “Tacto”.	57
3.2.2.1	Materiales.....	57
3.2.2.2	Reactivos.....	57
3.2.2.3	Procedimiento	57

3.3 METODOLOGÍA DE LA EXTRACCIÓN DEL CRUDO DE UN SUELO CONTAMINADO 60

3.3.1	Desarrollo del proceso de extracción de crudo de un suelo contaminado.....	60
-------	--	----

3.3.1.1	Materiales.....	61
3.3.1.2	Reactivos.....	61
3.3.1.3	Procedimiento	61
CAPÍTULO IV		72
DISCUSIÓN DE RESULTADOS		72
4.1	Resultados de la determinación de la textura de suelo.....	72
4.2	Resultados de los porcentajes de crudo extraídos en las muestras de suelos contaminados	75
4.3	Determinación de la Gravedad API	77
4.4	Selección del tratamiento a aplicar.....	77
4.5	Selección de las tecnologías aplicados a los tres sectores.....	80
CAPÍTULO V		83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		84
ANEXOS		87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El suelo.	5
Figura 2. Esquema que representa la formación de un suelo.	8
Figura 3. Diagrama triangular para determinar la textura del suelo.	10
Figura 4. Estructuras químicas de diferentes componentes mayoritarios del petróleo.	16
Figura 5. Esquema de estabilización físico- química.	23
Figura 6. Esquema de Vitrificación In situ	25
Figura 7. Proceso de extracción de vapores de los suelos in situ.	29
Figura 8. Proceso del enjuague del suelo in situ (con pozos verticales).	29
Figura 9. Proceso de Bioventing	33
Figura 10. Proceso de Biosparging	36
Figura 11. Mecanismos de la fitorremediación.	39
Figura 12. Esquema del proceso de depuración de un suelo por aire.	41
Figura 13. Esquema general del lavado de suelo	44
Figura 14. Esquema general de la extracción con disolventes.	45
Figura 15. Esquema general de la desorción térmica	46
Figura 16. Proceso de Landfarming	47
Figura 17. Esquema del proceso de remediación con biopilas.	49
Figura 18. Formación del compost	49
Figura 19. Ubicación geográfica del área de estudio.	53
Figura 20. Identificación de la zona de muestreo del sector Valparaíso.	55
Figura 21. Identificación de la zona de muestreo del sector Costa de Oro.	56
Figura 22. Identificación de la zona de muestreo del sector Santa Rosa.	56
Figura 23. Proceso de tamizado de la muestra de suelo Pozo VA 10.	58
Figura 24. Humedecer la muestra de suelo Pozo VA 10.	58
Figura 25. Formar una bola de 2,5 cm de diámetro de la muestra de suelo.	59
Figura 26. Textura de suelo Arenoso Franco.	59

Figura 27. Textura de suelo Franco Arenoso.....	60
Figura 28. Textura de suelo Franco.	60
Figura 29. Textura de suelo Franco Pesado, Limo y Arcilla.	60
Figura 30. Peso del papel filtro.....	62
Figura 31. Peso de la muestra de suelo junto con el papel filtro.	62
Figura 32. Balón de fondo plano de 100 ml de boca esmerilada 24/40.....	63
Figura 33. Balón de fondo plano con solvente cloroformo.	64
Figura 34. Tubo extractor con la muestra de suelo.....	64
Figura 35. Montaje del equipo soxhlet.	65
Figura 36. Solvente en la plancha de calentamiento.....	65
Figura 37. Evaporación del cloroformo en el extractor.	66
Figura 38. Proceso de extracción de crudo.	66
Figura 39. Muestra de suelo libre de crudo.....	67
Figura 40. Muestra de crudo extraído de un suelo.....	68
Figura 41. Rotavapor con el disolvente	69
Figura 42. Muestra de crudo sin solvente.	70
Figura 43. Pozo VA 10 con suelo contaminado por petróleo.	88
Figura 44. Afloramiento 1 de petróleo.....	88
Figura 45. Pozo SPA 0079 con suelo contaminado por petróleo.	89
Figura 46. Pozo SPA 0081 con suelo contaminado por petróleo.	89
Figura 47. Pozo SPA 0085 con suelo contaminado por petróleo.	90
Figura 48. Pozo SPA CH 1 con suelo contaminado por petróleo.....	90
Figura 49. Pozo SRA 056 con suelo contaminado por petróleo.	91
Figura 50. Pozo PETROPOLIS 0113 con suelo contaminado por petróleo.....	91
Figura 51. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo VA 10).....	92
Figura 52. Toma de muestra del suelo contaminado (AFLORAMIENTO 1).	92
Figura 53. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA 0079).	93

Figura 54. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA 0081).	93
Figura 55. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA 0085).	94
Figura 56. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA CH 1).	94
Figura 57. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo PETROPOLIS 0113).	95
Figura 58. Muestras de suelo no contaminado para determinar la textura del mismo.	96
Figura 59. Muestras de suelo contraminado de los diferentes pozos de petróleo.	96
Figura 60. Muestras de suelo libre de petróleo resultado de la técnica de extracción con solvente.	97
Figura 61. Petróleo extraído de la técnica aplicada a las muestras de suelo contaminado.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fracciones en función del tamaño de partícula.....	9
Tabla 2. Clasificación de crudo según grados API.....	17
Tabla 3. Técnicas de confinamiento	22
Tabla 4. Características de aplicación ex situ e in situ.	25
Tabla 5. Características de aplicación.....	42
Tabla 6. Diferentes sitios de muestreo de suelo.....	54
Tabla 7. Equipos de la Extracción de Soxhlet.	61
Tabla 8. Propiedades del Cloroformo	63
Tabla 9. Numero de sifones y parámetros de temperatura y stir.	67
Tabla 10. Condiciones de operación de la temperatura del baño.	68
Tabla 11. Porcentajes de arena, limo y arcilla para cada muestra de suelo.	73
Tabla 12. Resultados de la determinación textural por el método del tacto.	73
Tabla 13. Resultados de la extracción de crudo de los suelos contaminados.....	76
Tabla 14. Gravedad API	77
Tabla 15. Selección de la técnica de tratamiento in situ – ex situ para el sector 1.	80
Tabla 16. Selección de la técnica de tratamiento in situ – ex situ para el sector 2.....	81
Tabla 17. Selección de la técnica de tratamiento in situ – ex situ para el sector 3.....	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Clasificación de las Técnicas In Situ.	27
Gráfico 2. Ventajas y desventajas de los tratamientos fisicoquímicos.	27
Gráfico 3. Ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos.	30
Gráfico 4. Ventajas y desventajas de la biorremediación.	31
Gráfico 5. Condiciones para la aplicación del tratamiento de bioventeo.	35
Gráfico 6. Ventajas y desventajas de fitorremediación.	38
Gráfico 7. Ventajas y desventajas del tratamiento térmicos.	40
Gráfico 8. Características de lavado del suelo.	43
Gráfico 9. Características de lavado del suelo.	44
Gráfico 10. Características de biopilas.	48

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Identificación de las zonas potenciales con suelo contaminado.	88
ANEXO 2. Toma de la muestra de suelo en las zonas identificadas.	92
ANEXO 3. Muestras y resultados de laboratorio de petróleo UPSE.	96

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENEIRÍA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

**“TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR
HIDROCARBUROS APLICABLES EN EL CANTÓN SALINAS”**

Autor: Yagual Barzola Karen Rocío.

Tutor: Lic. Antonio Morato Medina, MSc.

RESUMEN

Desde el inicio de la explotación petrolera (a principios del siglo XX) en la Península de Santa Elena, los eventos de contaminación por petróleo han sido una constante problemática. Así mismo, también han existido emanaciones naturales que han afectado a diferentes zonas donde se produce este hidrocarburo.

Para contrarrestar la creciente preocupación a nivel mundial por el control y subsanación de los eventos de contaminación, han sido desarrolladas multitud de técnicas para la remediación de casos de contaminación de suelos con hidrocarburos por una gran cantidad de autores.

Es por tal motivo que en el presente trabajo se busca realizar una recopilación bibliográfica de las mejores técnicas de remediación aplicables, y en base al tipo de suelo, tipo de crudo y a factores económicos determinar cuáles de estas serían las mejores a ser aplicadas en el Cantón Salinas.

Para ello, se han realizado ensayos de extracción de crudo para su posterior caracterización de muestras de suelos contaminados recolectados en tres zonas de interés.

Palabras clave: remediación, suelos, hidrocarburos, contaminantes.

UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA

FACULTY OF ENGINEERING SCIENCES

PETROLEUM ENGINEERING CAREER

**“TECHNIQUES FOR THE RETRIEVAL OF CONTAMINATED SOILS BY ACTIVE
HYDROCARBONS IN THE "SALINAS" CANTON”**

Author: Yagual Barzola Karen Rocío.

Tutor: Lic. Antonio Morato Medina, MSc.

ABSTRACT

Since the beginning of oil exploitation (at the beginning of the 20th century) in the Santa Elena Peninsula, oil pollution events have been a constant problem. Likewise, there have also been natural emanations that have affected different areas where this hydrocarbon is produced.

To counteract the growing worldwide concern for the control and correction of pollution events, many techniques have been developed for the remediation of cases of soil contamination with hydrocarbons by a large number of authors.

It is for this reason that in this work we seek to make a bibliographic compilation of the best applicable remediation techniques, and based on the type of soil, type of crude and economic factors determine which of these would be the best to be applied in the Canton Salinas.

For this, crude oil extraction tests have been carried out for its subsequent characterization of samples of contaminated soils collected in three areas of interest.

Key words: remediation, soils, hydrocarbons, pollutants.

INTRODUCCIÓN

El petróleo es un recurso natural de mayor importancia en el desarrollo de la humanidad, es utilizada como fuente de energía. Este recurso natural ha generado un gran impacto ambiental negativo en varios países, debido al poco interés hacia este.

Por varios años la extracción de hidrocarburo en la Península de Santa Elena donde se realizaron actividades de perforación de pozos, llevando a cabo varios procesos antes de su extracción del crudo.

En la actualidad los problemas de contaminación a nivel mundial son parte de nuestra vida cotidiana y uno de las dificultades más serias que se presenta en la industria petrolera es la contaminación de suelos, donde el derrame y/o emanaciones de hidrocarburo son unos de los principales problemas.

La actividad petrolera ha ocasionado contaminación y cambios en el uso del suelo, como por ejemplo la remoción de materiales para la construcción de vías e instalaciones de pozos. De igual forma, los derrames petroleros han producido varios desastres ecológicos de impacto ambiental a nivel global.

Hoy en día existe un mayor interés por parte de los países dedicados a la explotación de petróleo a la minimización de los impactos generados por estas actividades, ya que estos generan riesgos directos a la salud humana y el entorno que los rodea.

Debido a estos problemas, se han venido desarrollando diversos métodos de remediación y de técnicas de tratamiento de suelo para su posible recuperación. A nivel local, esta investigación se centrará en el impacto ambiental que generan los derrames o afloramientos de crudos en zonas de interés del Cantón Salinas.

Se realizará una revisión bibliográfica de las técnicas o métodos de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos más modernos, para tener en cuenta los factores que van a condicionar la remediación y las ventajas y desventajas de cada tratamiento a ser propuestos en las zonas elegidas del Cantón Salinas.

CAPÍTULO I

1. Antecedentes

La agencia de protección de medio ambiente de los Estado Unidos ha realizado una labor de descripción de diferentes técnicas de tratamiento de suelos. Las técnicas de tratamientos consisten en la aplicación de procesos químicos, biológicos o físicos a desechos peligrosos o materiales contaminados con el fin de cambiar su estado de forma permanente. La finalidad de estas técnicas es destruir o modificar los contaminantes que son peligrosos, o reducir su peligrosidad (EPA, 1996).

De manera general, Coria, I. en 2007 realizó un estudio sobre remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, describiendo las principales técnicas.

Ramírez y Trujillo en 2012 y Suarez en 2013 realizaron estudios sobre la aplicación de la biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. La biorremediación aplican reacciones químicas para ser convertidas en componentes menos tóxicos, en Colombia se ha llevado a cabo el método de Biorremediación con lodos contaminados con hidrocarburos siendo una de las alternativas de recuperación de campos contaminados, ya sea, por derrames o residuos que aparecen en las actividades petroleras de explotación, transporte, distribución del producto, entre otras. Esta actividad petrolera fue centro de desarrollo del método ya mencionado obteniendo excelentes logros positivos en su impacto dando solución a la problemática sin afectar los diferente recursos sea de aire, agua y suelo.

En países como España, se han llevado a cabo varios proyectos relacionados con la temática de la tesis (Ortiz, Sanz, Dorado y Villar, 2007; Riesco, 2012), que de forma general describen las técnicas disponibles para la remediación de suelos contaminados.

El transporte de hidrocarburos, en cualquiera de sus formas, es una de las etapas más riesgosas y costosas porque existen casos en los que se han derramado millones de barriles en zonas selváticas, ríos, lagos y mares. Una de las metodologías aplicables es la biorremediación, tanto ex situ como in situ. (Torres y Zuluaga, 2009). Menciona que la contaminación de suelos por compuestos o desechos orgánicos de la actividad petrolera puede ser tratada y recuperados por el método de biorremediación, indicando que en los suelos de texturas arcillosas y arenosas empleará acondicionadores orgánicos permitiendo una mejor estructura que favorecerá la biorremediación. Los tratamientos ex situ como in situ es una alternativa que permite degradar el contaminante, el tratamiento ex situ presenta mejores resultados, ya estas pueden ser

controladas, pero a su vez tiene una desventaja de ser costoso cuando es transportada a la zona de tratamiento. En cambio menciona que el tratamiento in situ es recomendable para suelos permeables cuando existe contaminación en horizontes superficiales. Este tratamiento dependerá de su concentración, características del suelo tales como: disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura.

Se realizó un estudio de caso de suelos contaminados con hidrocarburos en el oriente ecuatoriano (Ortínez, Ize y Gavilán, 2003) causados por rebosamientos en los sistemas pluviales alrededor de las plataformas de perforación, que fueron cubiertos por una capa simple de tierra, por lo que causó una mezcla de contaminantes debido a la fuerza de gravedad. Utilizaron una alternativa correctiva de remediación de suelo contaminado con hidrocarburo, compatible y de bajo costo, aplicando capas de bacterias para la limpieza del contaminante que consistió en la destrucción de los hidrocarburos para convertirlos en agentes menos tóxicos.

En este caso trataron 140000 toneladas de suelos en plataformas, de los cuales fueron recuperados 35 sitios de suelos contaminados, el tratamiento que se aplicó alcanzó valores de TPH por debajo de 3000 ppm diferentes a los valores inferiores de 5000 ppm que había determinado el gobierno ecuatoriano en los casos anteriores.

En Ecuador se han desarrollado tesis en este ámbito, como reportó Cando en 2011 “Determinación y análisis de un proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos”, o la realizada por Celorio en 2016, “Remediación del derrame de crudo en el recinto WINCHELE desde una perspectiva ambiental y social” valorando el uso del Landfarming y el Compostaje para recuperar suelos contaminados. El caso de estudio que ocurrió en el recinto Winchele, Esmeraldas presentó un derrame de crudo suscitado que produjo una inestabilidad en el suelo de dicho lugar, aplicando las técnicas ya mencionadas. Landfarming es una tecnología ex situ de tratamiento biológico con microorganismos que pueden acelerar el proceso de degradación, este método aplica una capa de tierra de 50 cm de espesor permitiendo elevar el pH del suelo y la cantidad de hidrocarburo con el desarrollo de dichas bacterias.

El proceso de remediación de suelos va a regirse a las técnicas que son aplicables en función del grado de remediación se quiere conseguir, teniendo en cuenta los parámetros del suelo, el contenido que será extraído, etc.

2. Planteamiento del problema

En la actualidad existen casos de contaminación de suelos por hidrocarburos en el Cantón Salinas, ya sea por falta de control o instalaciones inadecuadas que generan contaminación ambiental y alteran la condición del suelo o por emanaciones naturales de petróleo en algunos casos.

Con el presente trabajo se plantea ofrecer soluciones a los problemas de contaminación de suelos detectados.

Un primer punto de partida para el conocimiento de estos problemas ambientales fueron los diversos proyectos de vinculación con la colectividad que se han llevado a cabo en la zona, entre ellos “Mitigar el nivel de contaminación generada por los pozos de petróleos, mediante un plan de acción, en el sector Valparaíso del Cantón Salinas, de la provincia de Santa Elena”, proyecto no publicado correspondiente al programa de vinculación con la colectividad 2017-2018 de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, bajo la coordinación de los docentes Rodríguez, R., Morato, A., Escandón P.C. y de los estudiantes de 8° y 9° semestre de la carrera de Ingeniería en Petróleos.

3. Justificación

En la industria petrolera la exploración, extracción y transporte de hidrocarburo ocasionan problemas de contaminación del suelo. Durante la realización del proyecto de vinculación en el sector Valparaíso cantón Salinas, se detectaron numerosas áreas donde había contaminación de suelos por emanaciones de hidrocarburos. Este hecho animó a profundizar en el estudio del problema.

La necesidad de sustentar la problemática establecida anteriormente, lleva al establecimiento de unas zonas de interés a partir de las cuales se estudiarán las diversas técnicas aplicables. Esto serviría de gran aporte para los habitantes y zonas aledañas afectadas por los pozos y zonas de emanaciones naturales, pues se mejoraría la calidad del suelo.

Así mismo, en varios talleres de vinculación con la colectividad, los GADs municipales han mostrado su interés en temas de remediación ambiental, por lo que se considera pertinente la elección del tema de tesis.

4. Objetivos

1. Objetivo general

Determinar mediante revisión bibliográfica y salidas de campo las técnicas de tratamiento más adecuadas para suelos contaminados por hidrocarburos en el Cantón Salinas para la recuperación de los mismos.

2. Objetivos específicos

1. Identificar la técnica de recuperación más eficiente para la remediación del suelo contaminado mediante el análisis de las diferentes alternativas.
2. Evaluar qué tecnología conseguiría reducir las concentraciones a niveles menos tóxicos para el ambiente y el entorno que los rodea.
3. Determinar los tipos de suelo en caso que sea posible, atendiendo a sus características principales según su formación, con el fin de poder afinar el tipo de tratamiento de recuperación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

1. SUELO

El término suelo deriva del latín “*Solum*” que significa tierra sólida. Se puede definir el suelo como un sistema biológicamente activo que se desarrolla en la superficie de la tierra y está formado por diferentes componentes, tanto bióticos como abióticos.

La Edafología define al suelo 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)" (López, 2005).

En el suelo se encuentra una gran variedad de microorganismos que pueden ser beneficiosos al momento de recuperación cuando haya sufrido alguna contaminación.



Figura 1. El suelo.

Fuente: Determinación y análisis de un proceso biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Cando, 2011).

1. Formación del suelo

El suelo proviene de la roca madre, provocando un cambio en su formación y en los factores ambientales, y por ende desarrollan varios procesos que convierten el material original en una morfología y otras propiedades.

En la formación de suelo actúan un conjunto de procesos heterogéneos, a continuación se menciona los principales factores de formación de suelo (López, 2006).

1. Litología

La litología estudia a las rocas, principalmente las características físicas del suelo (textura, permeabilidad, consistencia, entre otras) y químicas (riqueza en nutrientes, acidez, etc.). Las rocas que contienen abundantes minerales inestables se transforman fácilmente en los suelos, las arenas maduras contienen minerales muy estables y mientras tanto el cuarzo apenas llega a edafizarse pese a que está expuesto a largo tiempo a la meteorización.

2. Clima

El clima influye en la formación del suelo (humedad y temperatura) y también ejerce una alteración química del suelo, controla los procesos y su intensidad.

3. Relieve

El relieve influye directamente sobre el transporte por gravedad. Por otra parte los relieves abruptos ayudan en la erosión, originándose suelos lépticos y pocos profundos. Además hay aspectos como la insolación, drenaje del suelo y procesos geomorfológicos que también influyen en la formación del suelo.

4. Seres vivos

Los seres vivos en muchas ocasiones afectan al suelo de varias maneras, tanto positivas como negativas. Las plantas constituyen la principal fuente orgánica del suelo.

5. Edad

El tiempo es uno de los factores importantes en el suelo, de tal manera que los suelos más antiguos demuestran un mayor desarrollo en la profundidad del perfil y diversificación de horizontes.

La velocidad de formación del suelo se encuentra desde 1mm/año hasta 0,001 mm/año y se encuentra en función del día o el año.

1. Composición del suelo

Cando (2011) indica los cuatro componentes principales de la matriz de un suelo:

1. Minerales.

Este compuesto es el principal en la estructura del suelo ya que presenta el 45% del volumen total.

2. Aire – agua

Conjuntamente constituyen el volumen de poros, por lo general, ocupa entre el 25 de agua y 25% de aire, con un 50% volumen total del suelo. La proporción aire – agua cambia considerablemente con la humedad del suelo.

3. Organismos vivos

Ocupa menos del 1% de volumen.

4. Materia orgánica

Varía entre el 3 y 6% de volumen del suelo, con valor medio. Proviene de los residuos vegetales y animales, células microbianas, entre otras.

1. Perfil y horizontes del suelo

Se les denomina horizontes, a la aparición de una serie de capas desde la superficie hacia la roca madre y el conjunto de los horizontes es conocido como perfil del suelo.

En la clasificación del suelo se puede distinguir varios tipos de horizontes:

Horizonte H: horizonte de las turbas, capa del suelo donde se acumula materia orgánica sin descomponerse (López, 2006).

Horizonte O: horizonte orgánico (capa superficial del horizonte A) de un suelo mineral que hace referencia al suelo de bosque (Riesco, 2012).

Horizonte A: Es la capa más superficial del suelo, también conocida como zona de lavado vertical, abundan las raíces y en ella se pueden encontrar microorganismos, plantas y animales en su mayoría. Es de color oscuro debido a la presencia de abundante materia orgánica (Cando, 2011).

Horizonte E: horizonte mineral tiene como característica principal la pérdida de arcilla, aluminio, hierro. Son muy arenosos y de color claro, abundante en partículas de cuarzo (Castillo, 2009).

Horizonte B: conocida también como zona de precipitado, aquí se encuentran las raíces más profundas de los árboles, con menor cantidad de humus mezclado con fragmentos de rocas, acumulación de las arcillas, óxidos e hidróxidos metálicos que han sido arrastradas por el agua de horizonte y su color es más claro (Cando, 2011).

Horizonte C: es el horizonte más profundo que se forman fragmentos rocosos, es la zona de contacto entre el suelo y la roca madre. Sirven como soporte a los dos horizontes anteriores (Cando, 2011).

Horizonte R: material originario. Es la capa más profunda del suelo y se conoce como roca madre (López, 2006).

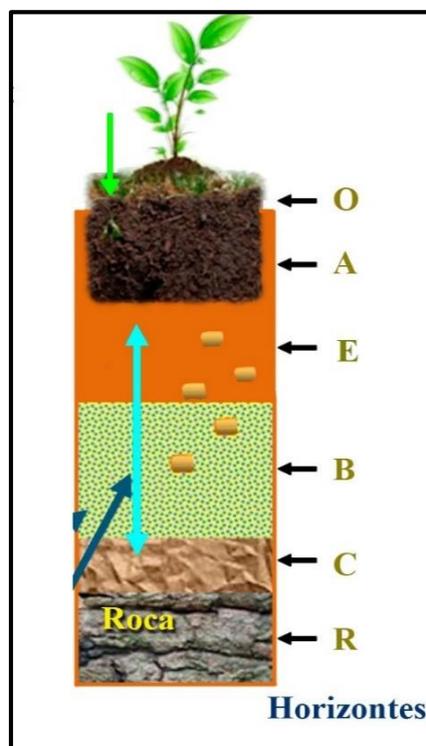


Figura 2. Esquema que representa la formación de un suelo.

Fuente: El suelo y su multifuncionalidad (N. M. Montaña y E. Chimal, 2017).

2. Propiedades físicas y químicas del suelo

Las propiedades del suelo son de gran importancia y tienden a mostrar el estado y comportamiento de las sustancias contaminantes que se presentan en cualquier área afectada.

1. Propiedades físicas del suelo

1. Textura del suelo

La textura del suelo se refiere a la cantidad y tamaño en la que se encuentran los elementos (Figura 3), detallando las características granulométricas del suelo como arena, limo y arcilla, dependiendo de la evolución del suelo y de la roca madre (Castillo, 2009).

En la tabla descrita a continuación se observan dos clasificaciones, establecidas por International Society of Soil Science (ISSS) y United States Department of Agriculture (USDA).

Tabla 1. Fracciones en función del tamaño de partícula.

FRACCIÓN DEL SUELO		ISSS (mm)	USDA (mm)
Arena	Arena muy gruesa	-	2.00 – 1.00
	Arena gruesa	2.00 – 0.20	1.00 - 0.50
	Arena media	-	0.50 – 0.25
	Arena fina	0.20 – 0.002	0.25 – 0.10
	Arena muy fina	-	0.10 – 0.05
Limo		0.02 – 0.002	0.05 – 0.002
Arcilla		< 0.002	< 0.002

Fuente: Propiedades físicas del suelo (Ing. Agr. L. Rucks, Ing. Agr. F. García, Ing. Agr. A. Kaplán, Ing. Agr. J. Ponce de León & Ing. Agr. M. Hill, 2004).

A continuación se definen los elementos que conforman el suelo:

Arena

La arena se clasifica en arena muy gruesa, arena gruesa, arena media, arena fina, arena muy fina. Cuando existe gran cantidad de partículas del tamaño de las arenas, el suelo tiene textura arenosa. Estos suelos suelen tener poca capacidad de retención de agua y una permeabilidad alta.

2. Estructura del suelo

La estructura del suelo es la forma que se agrupan y ordenan las partículas del mismo, como tal, la formación de estas estructuras depende de la cantidad y estado en el que se haya los coloides del suelo. Cada estructura de unión de las partículas tiene gran importancia en el sistema poroso, influyendo sobre la cantidad, forma, tamaño, continuidad, estabilidad y permanencia de los poros, determinando la permeabilidad del perfil y la velocidad de infiltración del agua a través del suelo (Cando, 2011).

La estructura del suelo está definido por:

1. Forma. Se hallan formas prismáticas, granulares, angulares, etc.
2. Tamaño. Se clasifican en gruesa, media, fina y muy fina.
3. Grado de desarrollo de los agregados. Puede ser fuerte, medio, débil o nulo.

Densidad

Existen dos tipos de densidad: densidad aparente, que se refiere a la masa de por unidad de volumen de una muestra de suelo y densidad real, que se refiere a la densidad media de las partículas sólidas del suelo y depende de su composición.

Porosidad

Se define como el coeficiente entre el volumen de poros y el volumen total. Se expresa en tanto por ciento (%).

1. Propiedades químicas del suelo

Aparte de las propiedades físicas de los suelos también se describen algunas de las propiedades químicas que son de gran importancia para determinar el comportamiento de las sustancias que contaminan el suelo.

1. La humedad del suelo

Es la cantidad de agua por volumen de tierra que existe en un terreno, su medición exacta se realiza gravimétricamente pesando una muestra de tierra antes y después del secado. La humedad del suelo influye en gran medida en la actividad biológica (Cando, 2011).

2. El pH del suelo

En la mayoría de suelos el valor del pH varía entre 4 y 8, es decir, si el pH es superior a 8 poseen una gran cantidad de sales o un elevado porcentaje de Na^+ en sus sitios de intercambio iónico. En cambio si el pH es inferior a 4 posee concentraciones importantes de ácidos. (Cando, 2011).

3. Salinidad del suelo

La salinidad del suelo se define como la concentración de sales solubles, tanto de origen natural como antropogénica. La sal dominante es el cloruro de sodio (NaCl). La pérdida de fertilidad es una de las consecuencias de la salinización (Cando, 2011).

2. EL PETRÓLEO

1. Definición

La palabra petróleo proviene del latín *Petroleum*, cuyos términos significan *petro* [roca] y *óleum* [aceite]. Se define como una mezcla natural de diferentes compuestos hidrocarbúricos. Se forma por la descomposición de materia orgánica, bajo determinadas condiciones de presión y temperatura.

2. Composición de los hidrocarburos

El petróleo se caracteriza por ser un líquido negro, viscoso y con una composición química compleja, que incluye diferentes grupos de hidrocarburos. Los hidrocarburos del petróleo se pueden dividir en cuatro categorías de compuestos (Torres & Zuluaga, 2009):

1. Los saturados: n-alcenos, alcenos ramificados con cadenas alquílicas, las cicloparafinas o cicloalcenos y los hópános, su fórmula general es $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$.
2. Los aromáticos: su forma general es $\text{C}_n\text{H}_{2n+6}$, basados en hidrocarburos monoaromáticos, diaromáticos y aromáticos policíclicos (HAPs).
3. Las resinas: compuestos de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfoxidos y amidas.

4. Los asfáltenos: menos abundantes y consiste en moléculas polares, encontrando hidrocarburos heterocíclicos, agregados de HAP, ácidos naftenicos, sulfuros, ácidos grasos, metaloporfirinas, fenoles polihidratados.

1. Composición por familias de hidrocarburos

La familia de los hidrocarburos se agrupa de la siguiente manera (Ponce, 2014):

1. Parafinas volátiles (n-alcenos e isoprenoides volátiles)

Son alcanos ramificados y no ramificados, están formados por cadenas de 1 – 10 átomos de carbono, este representa hasta un 30% del crudo de petróleo. Es la fracción más volátil del crudo y por ende son las más susceptibles en pérdida abióticas por volatilización.

2. Parafinas no volátiles (n-alcenos e isoprenoides)

Se definen como alcanos lineales y ramificados formados por cadenas de 11 – 40 átomos de carbono, representan 15% - 20% del crudo de petróleo. Los componentes entre C₁₁ y C₁₅ son de volatilidad intermedia.

3. Naftenos (cicloalcanos)

Está compuesta por las cicloparafinas o cicloalcanos, siendo los compuestos más abundantes de esta familia los ciclopentanos alquilados que representan el 31% del crudo de petróleo.

Los compuestos mono y dicíclicos comprende el 50 – 55% de esta fracción, en cambio los tricíclicos un 20% y por ultimo están los tetracíclicos con un 25%.

4. Oleofinas (alquenos)

Son alquenos que están poco presentes en el crudo de petróleo. Tienen importancia en los productos resultantes del refinado que se generan durante el proceso de cracking de un 30% en gasolina y 1% en fuel.

5. Aromáticos

Los compuestos aromáticos tienen estructuras que presentan uno o varios anillos bencénicos, entre ellos se encuentran los hidrocarburos monoaromáticos (un anillo bencénico), diaromáticos (dos anillos bencénicos) y poliaromáticos (HAPs, con más de dos anillos bencénicos).

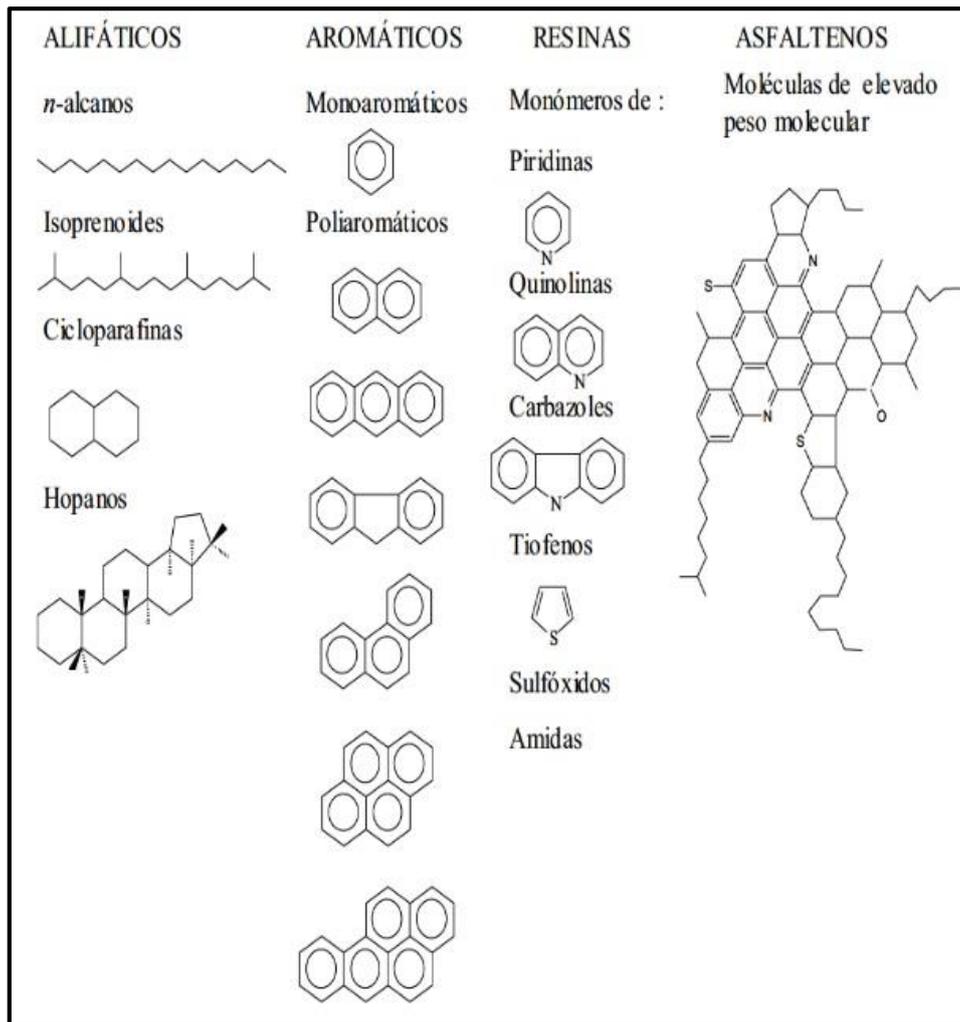


Figura 4. Estructuras químicas de diferentes componentes mayoritarios del petróleo.
Fuente: Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos (Torres & Zuluaga, 2009).

2. Clasificación del petróleo según su Gravedad API

La gravedad API es una unidad desarrollada por el “American Petroleum Institute” en el año 1921, la cual, es creada para clasificar los líquidos menos densos que el agua y está asociada con la gravedad específica. Como se ve en la ecuación 1:

$$API = \frac{141.5}{Gravedad\ específica\ del\ fluido} - 131.5 \quad Ec. 1$$

El petróleo es clasificado en liviano, mediano, pesado y extrapesado de acuerdo a su gravedad API. Según esta clasificación se muestra la siguiente tabla:

Tabla 2. Clasificación de crudo según grados API.

Denominación del crudo	Grados API
Extrapesados	< 10
Pesados	10 – 22.3
Mediano	22.3 - 31.1
Liviano	> 31.1

Fuente: Aplicación de procesos biológicos como medida remediación para recuperar suelos limo arcillosos contaminados con gasolina (Toledo, 2009).

2. CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La contaminación del suelo se define como aquellas características que han sido alteradas por la presencia de compuestos tóxicos persistentes, compuestos químicos de alta peligrosidad, y en contracciones que sobrepasan los niveles genéricos de referencia teniendo como consecuencia un riesgo para la salud humana o el medio ambiente (Riesco, 2012).

A partir del desarrollo de las distintas actividades industriales en el siglo XVIII, se distingue dos tipos de contaminación (Castillo, 2009):

1. Contaminación natural o endógena

La contaminación natural es el proceso de concentración y toxicidad que presenta determinados elementos metálicos, los cuales están presentes en los minerales que componen algunas rocas.

2. Contaminación antrópica o exógena

Este tipo de contaminación es causada por las actividades antropogénicas y conlleva un cambio negativo en las propiedades de un suelo.

1. CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR HIDROCARBUROS

Los problemas de contaminación por hidrocarburos han causado a nivel mundial una contaminación de suelos difícil de calcular, es decir, no solo la contaminación que provoca al medio, sino por los hidrocarburos compuestos tóxicos para la salud humana o los seres vivos, ya que ocasionan problemas cancerígenos y mutagénicos.

La contaminación por hidrocarburos tiene un impacto perjudicial en el suelo, provocando cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas con alteraciones tanto a corto como a largo plazo, dependiendo de la concentración y el tiempo que tendrá contacto el suelo con el contaminante.

Un ejemplo lo representan los suelos arcillosos. La contaminación es menor porque el hidrocarburo penetra a poca profundidad y esto facilita la labor de limpieza. En el caso de los suelos arenosos los hidrocarburos penetran con mayor rapidez y a mayor profundidad. La presencia de materia orgánica facilita que el crudo se adhiera a las partículas y a los restos vegetales.



Figura 5. Contaminación de hidrocarburo en el sector Valparaíso.

Fuente: Mitigar el nivel de contaminación generada por los pozos de petróleos, mediante un plan de acción, en el sector Valparaíso del Cantón Salinas, de la provincia de Santa Elena, 2018

1. Fuentes de generación de contaminación del suelo con hidrocarburos

Las fuentes de contaminación son aquellos procesos o actividades que generan contaminación ambiental. Pueden ser de origen natural o antropogénico. Se clasifican en (Cando, 2011):

Fuentes puntuales. Se define como aquellos contaminantes que llegan al receptor desde un punto de descarga fijo, sin problemas para determinarlo. Entre ellas pueden estar los sistemas de tratamientos de aguas residuales, industriales, etc.

Fuentes difusas. Son aquellos contaminantes que llegan al medio receptor desde lugares amplios y extendidos, como pueden ser escurrimientos agrícolas, mineros y urbanos.

2. Clasificación de las fuentes de contaminación de acuerdo al origen

Las fuentes de contaminación pueden ser fuentes naturales, tales como, la erosión, erupciones volcánicas, deslizamientos, entre otros desastres naturales que tienden a provocar contaminación del suelo.

Las fuentes de contaminación antropogénico son (Cando, 2011):

1. Fuentes tecnológicas
2. Fuentes industriales
3. Fuentes agrícolas
4. Fuentes pecuarias
5. Fuentes domésticas y municipales

La industria petrolera es la que genera mayor contaminación del suelo por hidrocarburos y sus derivados. Los eventos más comunes son:

1. Derrames de hidrocarburo
2. Fugas
3. Negligencia operacional
4. Incumplimiento de las normas ambientales

1. Efecto contaminante de la industria petrolera en el suelo

Existe una gran variedad de impactos ambientales que se producen en las labores de exploración, explotación y transporte de hidrocarburos. En las operaciones petroleras el suelo es afectado de dos formas:

1. **De forma directa**, es decir, los lugares donde se encuentran ubicados los emplazamientos de las plataformas petroleras, depósitos y campamentos de trabajadores. Se debe considerar las características, permeabilidad, pH y alcalinidad para minimizar el impacto.

2. **Por el manejo de los combustibles y productos químicos**, este impacto depende del tipo de contaminante, ya sea por su densidad, viscosidad y tensión de interfase, cantidad derramada, permeabilidad del suelo y profundidad.

1. **Criterios de selección del método de recuperación de un suelo contaminado**

Existen una variedad de criterios para seleccionar adecuadamente un método de recuperación de un suelo contaminado. Para ellos se toman en cuenta las siguientes características (Roqueta, 2016):

1. Tipo de suelo
2. Tipo de contaminante y su grado de contaminación
3. Duración del tratamiento
4. Factores tecnológicos
5. Generación de residuos
6. Eficacia a corto y largo plazo
7. Relación de costo
8. Adecuación a la normativa
9. Grado de protección de la salud humana

1. RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

En los últimos años los estudios realizados para tratar de recuperar los suelos contaminados ha ido creciendo, la importancia de la aplicación de estas técnicas de recuperación de suelos contaminados radica en su aplicación. Están diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes, haciendo posible una alteración en su estructura química mediante aplicación de procesos químicos, térmicos y biológicos.

Después de haber definido varios temas de los suelos contaminados, podremos mencionar varias alternativas de estudios para la elección de las técnicas para su recuperación adecuada (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007):

1. Técnicas de confinamiento
2. Técnicas de tratamiento
3. Técnicas de puesta en contacto
4. Excavación y depósito final
5. Atenuación natural

1. DEFINICIÓN DE TÉCNICAS DE CONFINAMIENTO

Las técnicas de confinamiento o también conocidas como estabilización/solidificación, se basa en mitigar la movilidad de los contaminantes en el suelo mediante procesos y físicos y químicos, ya que estos se convierten en formas solubles y menos tóxicas (estabilización) o son encapsulados en una estructura sólida (solidificación). (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007)

Las técnicas de confinamiento se clasifican en función de su acción y se sintetizan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Técnicas de confinamiento

TECNOLOGÍAS	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
Procesos Físicos – Químicos		
Estabilización Física – Química	Los contaminantes se inmovilizan en una masa o se reduce su movilidad con agentes estabilizantes mediante procesos físico – químicos	Ex situ
Inyección de solidificantes	Inyección en el terreno de lechadas de elementos solificantes para inmovilizar la zona contaminada.	In situ
Procesos Térmicos		
Vitrificación	Los contaminantes se estabilizan mediante aplicación de altas temperaturas.	In situ/Ex situ

Fuente: Guía de tecnologías de recuperación de suelos contaminados (Kaifer J., Peña A., Arana E., Balseiro C., Torá I., Caleyá J. & Pijls C., 2006).

1. PROCESOS FÍSICOS - QUÍMICOS

1. Estabilización físico- química

Es una técnica ex situ que reduce la movilidad de los contaminantes, es decir, mezclando el suelo contaminado con aditivos (orgánicos o inorgánicos) adecuados para que el tratamiento

de resultado, ya sea con reacciones químicas que reducen la solubilidad en el suelo y presente menor lixiviación que el suelo original.

Aplicación

Esta técnica es adecuada para el tratamiento de suelos contaminados con compuestos inorgánicos (en especial los metales pesados), puesto que si se tratase de componentes orgánicos volátiles no se tendría la capacidad de poder estabilizarlos y se emitirían a la atmosfera durante el proceso de tratamiento.

Los procesos de estabilización conllevan un incremento del volumen inicial de suelo contaminado. El suelo es pretratado para poder eliminar la fracción gruesa y finalmente se mezcla en tanques de aguas o vertederos. Se añaden como aditivos o agentes estabilizantes como por ejemplo cementos, fosfatos o álcalis, que ayudará a aumentar el pH y favorecer la precipitación e inmovilización de determinados metales (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007).

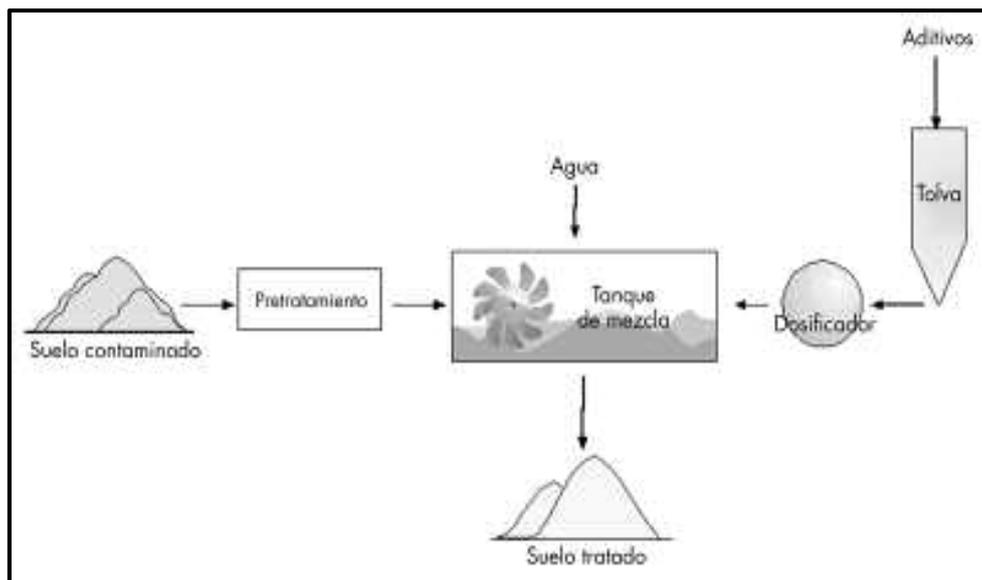


Figura 6. Esquema de estabilización físico- química

Fuente: Guía tecnológica de recuperación de suelos contaminados (Kaifer, Aguilar & Arana, 2006).

Aspectos ambientales

Los procesos de estabilización físico – químicos se relacionan con el aumento del volumen inicial del suelo contaminado y en lo que respecta al material que no puede ser reutilizado, se lo gestiona como un residuo.

2. Inyección de solidificantes

La inyección de solidificantes es una técnica de carácter in situ, cuyo principio se asemeja a la técnica anterior (estabilización). Está se encarga de reducir la movilidad de los contaminantes mediante aditivos orgánicos o inorgánicos, formando una baja permeabilidad y potencial de lixiviación (Kaifer, Aguilar, Arana, Balseiro, Torá, Caleyá & Pijs, 2006).

Aplicación

En esta técnica los agentes inorgánicos (cemento) u orgánicos (sustancias bituminosas), el polietileno o las parafinas, se inyectan in situ en el suelo afectado por pozos de igual similitud a los que se utilizaron durante el sellado profundo o mezclados con el suelo (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007).

Por ejemplo, al mezclar el cemento con el suelo afectado se provoca un endurecimiento, esta mezcla crea un sólido que puede permanecer en el lugar o ser transportando a otro sitio. La solidificación no elimina los químicos nocivos, sino que los atrapa en el lugar (EPA 542-F-01-024S, 2003).

Se aplica en suelos contaminados con sustancias inorgánicas, con limitada eficacia para compuestos orgánicos semivolátiles o pesticidas (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007).

2. PROCESOS TÉRMICOS

1. Vitrificación

Esta técnica es un proceso de estabilización térmica. Se aplica calentamiento al suelo contaminado a altas temperaturas, para conseguir su fusión y transformación en un material cristalino y químicamente estable.

Este método puede ser aplicado de dos formas tanto in situ como ex situ y se emplea corriente eléctrica para fundir el suelo junto con los contaminantes. Con esta técnica se tratan compuestos orgánicos semivolátiles, compuestos inorgánicos, PCBs, pesticidas y dioxinas (Roqueta, 2016).

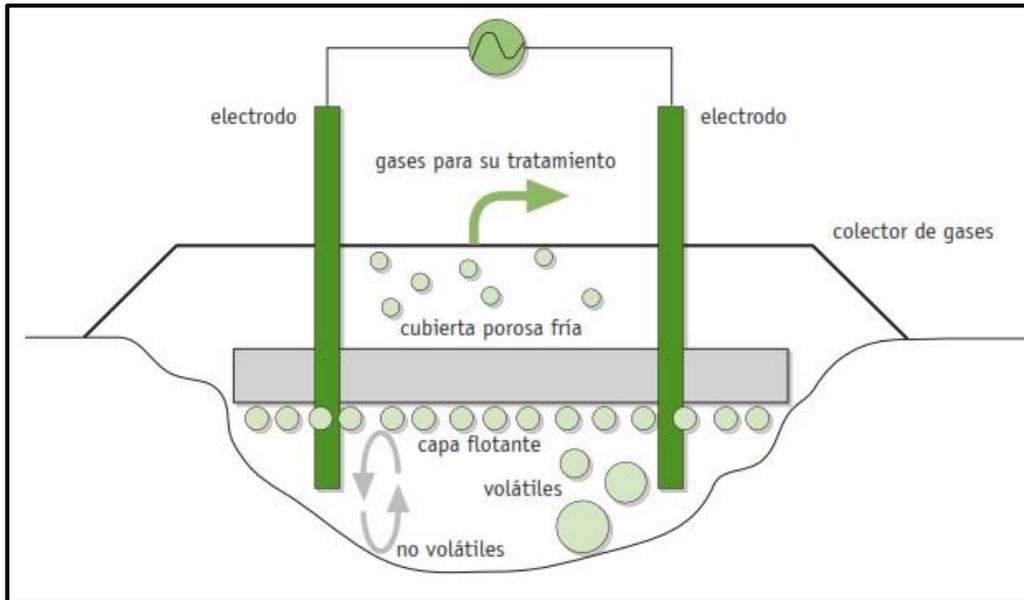


Figura 7. Esquema de Vitrificación In situ

Fuente: Técnicas de recuperación de suelos contaminados (Khan et al., 2004).

Aplicación

Esta técnica logra reducir la movilidad de los compuestos contaminantes inorgánicos, entre los principales Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros, y facilitar así la destrucción de los componentes orgánicos por reacciones de oxidación y/o pirólisis.

Si se desea obtener resultados favorables del tratamiento es esencial que el suelo contenga una cantidad apropiada y suficiente de sílice, logrando la formación de la masa vítrea y óxidos alcalinos (Na, Li, K) que le proporcionan estabilidad (Kaifer, Aguilar, Arana, Balseiro, Torá, Caleyá & Pijs, 2006).

Tabla 4. Características de aplicación ex situ e in situ.

Aplicación ex situ	Aplicación in situ
El calentamiento del suelo se puede obtener en diversos sistemas ya sean estos por plasma, corriente directa, combustión, inducción o microondas.	El calentamiento empieza en la deposición de una capa de material de alta conductividad eléctrica por medio de electrodos de grafito que están insertados en el suelo.
Una vez separados los elementos gruesos del suelo, es incrustado en un horno a través de una corriente eléctrica sometida a una temperatura de 1100 – 1400 °C	Es utilizada para tratar contaminantes pocos profundos y a gran escala, consiguiendo reducir en gran medida su lixiviado del suelo. Con temperatura mayor de 1600 – 2000 °C.

**Fuente: Guía de tecnologías de recuperación de suelos contaminados (Ortiz et al., 2007).
Editada por: Karen Yagual, 2020.**

2. DEFINICIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

Las técnicas de tratamientos son definidas como una aplicación de procesos químicos, físicos o biológicos a suelos contaminados, teniendo como propósito que el cambio de estado sea duradero. Se puede clasificar de distintas maneras:

1. En función del lugar donde se lleva a cabo el tratamiento del suelo.
 1. Técnicas in situ
 2. Técnicas on site
 3. Técnicas ex situ
4. En función de las características de las tecnologías aplicables.
 5. Métodos físicos de evacuación de la contaminación
 6. Métodos químicos o electroquímicos
 7. Métodos térmicos
 8. Métodos biológicos

1. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO IN SITU

Estas técnicas son las más aplicadas para la recuperación de suelos contaminados, ya que no es necesario la extracción del material contaminado.

Las técnicas in situ pueden emplear distintos tipos de tratamiento que se muestran en el siguiente gráfico:

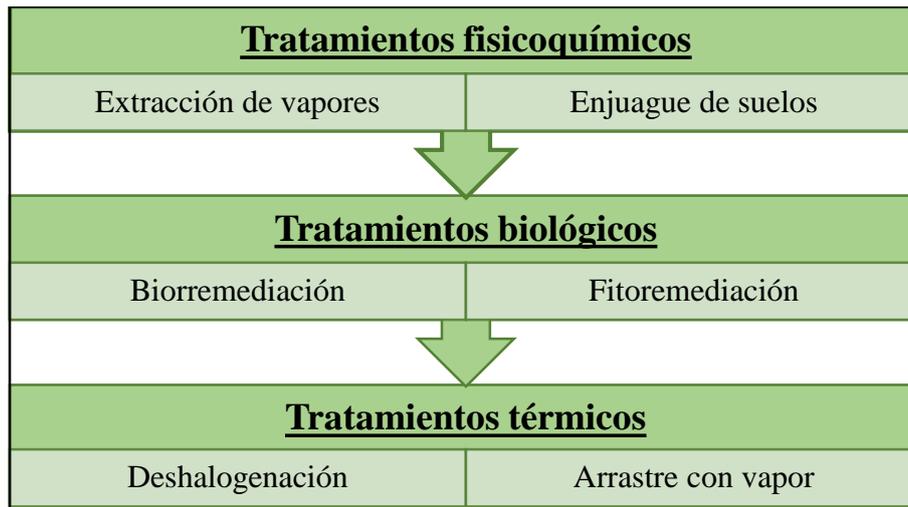


Gráfico 1. Clasificación de las Técnicas In Situ.
Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

1. TRATAMIENTOS FISICO - QUÍMICOS

Este tratamiento utiliza propiedades físicas de los contaminantes o del suelo para destruir, separar o contener la contaminación. Suelen ser efectivos en corto plazo de tiempo a diferencia de otros tipos de técnicas.

En esta técnica se generan productos residuales que deben ser objeto de tratamiento o de una gestión adecuada.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Son efectivos en cuanto a costos. • Pueden realizarse en periodos cortos. • El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos. • Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.

Gráfico 2. Ventajas y desventajas de los tratamientos fisicoquímicos.
Fuente: Tecnologías de remediación (INECC, 2004).
Editada por: Karen Yagual, 2020.

Estos tratamientos se clasifican en dos tipos que son la extracción de vapores o el enjuague de suelos.

1. Extracción de vapores del suelo (SVE)

La extracción de vapores del suelo es una técnica de tratamiento conocida también como venteo del suelo que consiste en la generación de un flujo de aire controlado en el suelo, se genera un gradiente de presión, efectuando un vacío a través de pozos verticales o trincheras horizontales.

Los elementos volátiles se eliminan en estado vapor del suelo por medio de un gradiente de presión/concentraciones aplicado al vacío, llevado a cabo mediante pozos de extracción. Esta técnica se aplica en ciertos combustibles volátiles y para VOCs pero no es recomendable para aceites, PCBs e hidrocarburos pesados. No es tan eficiente en suelos con elevado contenido de finos y suelos saturados. Comercialmente es una técnica muy disponible ya que tiene un buen funcionamiento en suelos que tienen permeabilidades altas. Los gases resultantes reciben tratamiento, al igual que los líquidos residuales. Los VOCs removidos son limitados en dependencia de los suelos secos y contenido orgánico alto (Coria, 2007).

Los vapores producidos se eliminan aplicando una depresión mediante bombas de vacío a través de pozos de extracción o recuperación. El aire que sale de estos pozos se conduce a unidades de tratamiento de gases dotadas de filtros de carbón activado o convertidores catalíticos.

Para obtener mayor eficacia de los pozos de extracción y minimizar la infiltración y el contenido en humedad del suelo, habitualmente, se cubre la superficie del terreno suelo a tratar con una lámina de plástico, arcilla, cemento o asfalto.

Esta técnica es eficaz para recuperar suelos contaminados con compuestos de bajo peso molecular y elevada volatilidad. Para que sea efectiva, los contaminantes deben tener la constante de Henry superiores a 0,01 o presiones de vapor mayores de 0,5 mm de Hg.

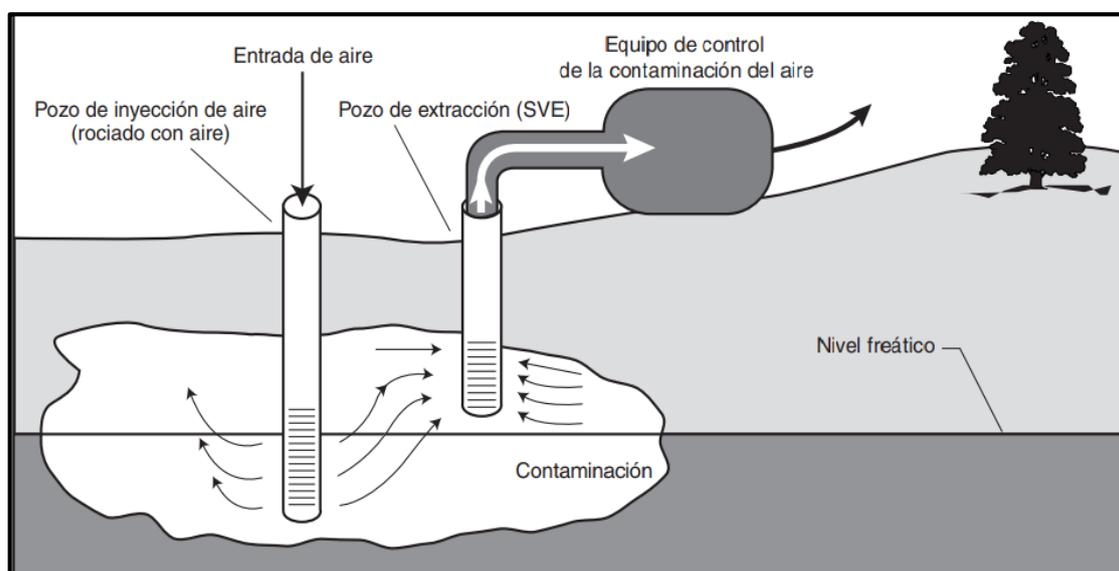


Figura 8. Proceso de extracción de vapores de los suelos in situ.

Fuente: Guía de EPA 542-F-01-006S, 2001.

2. Enjuague de suelos

El enjuague de suelos consiste en el lavado de suelos contaminados con soluciones acuosas. Las soluciones usadas pueden ser agua o disoluciones acuosas con ácidos, bases o disolventes incorporados, pero van a depender del tipo de contaminación en el suelo.

La infiltración de la solución utilizada en el suelo puede llevarse a cabo mediante zanjas, pozos verticales, riegos o conducciones horizontales. Para la extracción del agua se pueden utilizar tuberías horizontales o pozos. Estos últimos tienen la ventaja de que las necesidades de excavación de suelo son mínimas. En la Figura 9 se ve un esquema de aplicación in situ de esta técnica.

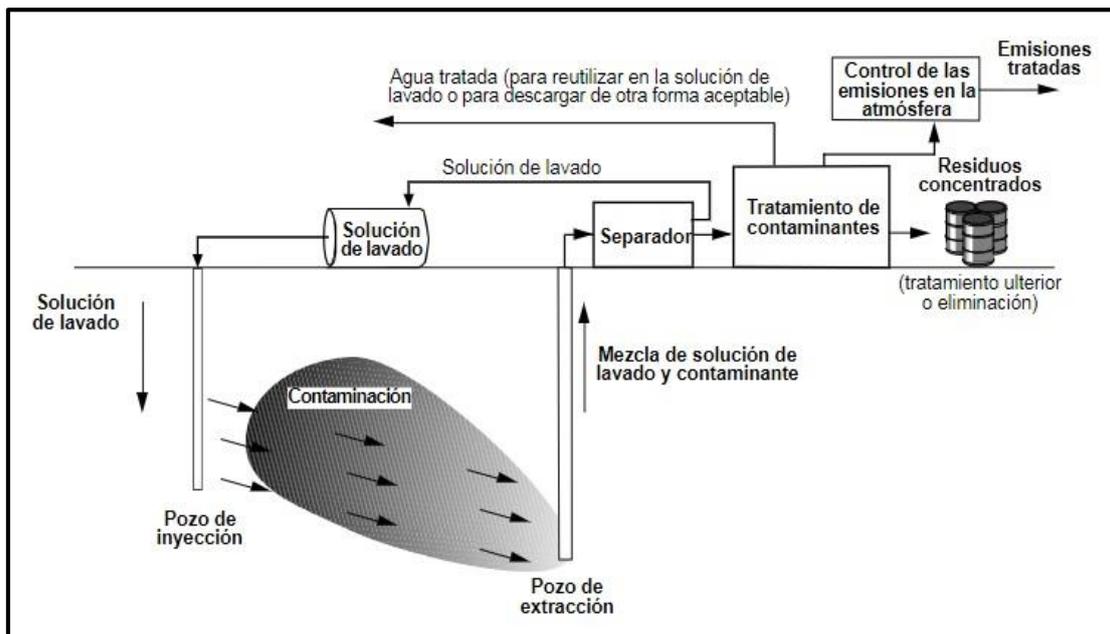


Figura 9. Proceso del enjuague del suelo in situ (con pozos verticales).

Fuente: Guía de EPA 542-F-96-022, 1996.

Aplicación

La técnica de enjuagues de suelo se ha aplicado a suelos contaminados por:

1. metales pesados
2. cianuros metálicos

3. disolventes halogenados
4. hidrocarburos aromáticos
5. gasolinas
6. aceites minerales
7. fenoles colorados, etc.

1. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos se basan en la degradación de los agentes microbianos, es decir, utilizan las actividades metabólicas de organismos vivos (plantas, hongos, bacterias) para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos. El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de microorganismos y/o vegetales 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 biotransformación o mineralización.

Las plantas son utilizadas para la descontaminación ya que tiene una capacidad de mineralizar determinados compuestos tóxicos, de acumular o concentrar metales pesados.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Son efectivos en cuanto a costos. • Son tecnologías más benéficas para el ambiente. • Los contaminantes generalmente son destruidos. • Se requieren un mínimo o ningún tratamiento posterior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren mayores tiempos de tratamiento. • Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. • No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.

Gráfico 3. Ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos.

Fuente: Tecnologías de remediación (INECC, 2004).

Editada por: Karen Yagual, 2020.

Este tipo de tratamiento se clasifica en:

1. Biorremediación

Actualmente es considerado como uno de los medios apropiados para restaurar sitios contaminados, se la puede definir como una de las técnicas innovadoras en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. Este método biológico es considerado adecuado y económico para los tratamientos de este tipo de material ya que al ser aplicado presenta menor impacto en el sitio del problema.

Se define biorremediación como proceso de aceleración de la tasa de degradación natural de hidrocarburos por adición de fertilizantes para provisión de nitrógeno y fosforo a los microorganismos que se alimentaran del crudo.

El tratamiento puede llevarse a cabo “in situ”, excavando el terreno y tratándolo a pie de excavación, o “ex situ”, instalaciones aparte (Suárez, 2013).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Transfiere poca contaminación de un lugar a otro. • Es una técnica poco invasiva y no requiere componentes estructurales o mecánicos que provoque una amenaza para el medio. • Es económica viable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando la biodegradación es incompleta genera intermediarios metabólicos inaceptables, es decir, presenta una contaminación similar o superior al producto anterior • Difícil predecir el tiempo requerido para un proceso adecuado.

Gráfico 4. Ventajas y desventajas de la biorremediación.

Fuente: Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Torres & Zuluaga, 2009).
Editada por: Karen Yagual, 2020.

Factores que condicionan la biorremediación de un suelo:

1. Temperatura
2. pH
3. Humedad
4. Nutrientes
5. Aceptor de electrones
6. Microorganismos
7. Estructura del suelo

8. Estructura del contaminante

1. Biorremediación In Situ

El tratamiento in situ es una de las opciones adecuada para la recuperación del suelo, ya que no requiere excavar y retirar el material contaminado, es decir, se puede degradar los contaminantes en el mismo sitio en donde se encuentran, permitiendo tener menos liberación de polvo y contaminantes. Además, se puede mencionar que el propio suelo funciona como un reactor biológico.

La biorremediación in situ utiliza microorganismos propios del sitio contaminado (autóctonos), que pueden degradar un gran número de constituyentes del contaminante, pero su eficacia y su población pueden ser afectados cuando algunos contaminantes tóxicos se presentan en altas concentraciones. La reintroducción de microorganismos aislados de un sitio contaminado ayuda a resolver este problema ya que los microorganismos pueden degradar los constituyentes y tiene una gran tolerancia a la toxicidad (Suárez, 2013).

El fundamento básico del método de biorremediación se basa en la rotura de la estructura de los hidrocarburos para transformarlos en los componentes no tóxicos de dióxido de carbono, biomasa y agua.

Antes de aplicar el tipo de tratamiento se debe tomar en cuenta varios factores entre ellos (Suárez, 2013):

1. Impacto ambiental en la zona.
2. Actividades industriales que pueden verse afectadas.
3. Costos comparativos con otros tratamientos.
4. La dificultad de acceso a la zona contaminada para proveer de oxígeno y nutrientes.
5. La determinación del porcentaje de tratamiento.
6. La velocidad del proceso.
7. El potencial peligro de extensión de la contaminación.

En este tratamiento in situ de suelos, existen dos tipos: tratamiento de compuestos volátiles y tratamiento de compuestos semivolátiles y no volátiles (Korda, Santas, Tenente & Santas, 1997).

A continuación, se describen los métodos más utilizados en la biorremediación.

1. Bioventeo o Bioaireación In Situ del suelo

El Bioventeo del suelo (bioventing) consiste en la inyección a través de pozos de aire o también de nutrientes para poder estimular el crecimiento y desarrollo de la actividad microbiana biodegradadora.

Se utilizan microorganismos para realizar la biodegradación de los compuestos orgánicos que son absorbidos en los suelos en la zona no saturada. Este tratamiento es parecido a la extracción de vapor del suelo, pero se diferencia por tratar de potenciar la biodegradación y minimizar la volatilidad del contaminante.

Es considerada una técnica aplicable a medio y largo plazo. Se aplica para suelos contaminados por compuestos biodegradables (hidrocarburos del petróleo, aceites minerales, queroseno). Para el diseño de este sistema se consideran dos factores importantes para controlar el funcionamiento del sistema: la permeabilidad del suelo, permitiendo determinar el radio de influencia de los pozos de venteo, la distancia entre pozos y las dimensiones de los equipos de inyección y estos facilita el transporte de oxígeno y el segundo factor es la biodegradabilidad del compuesto orgánico, que ayuda a determinar la velocidad y grado de degradación.

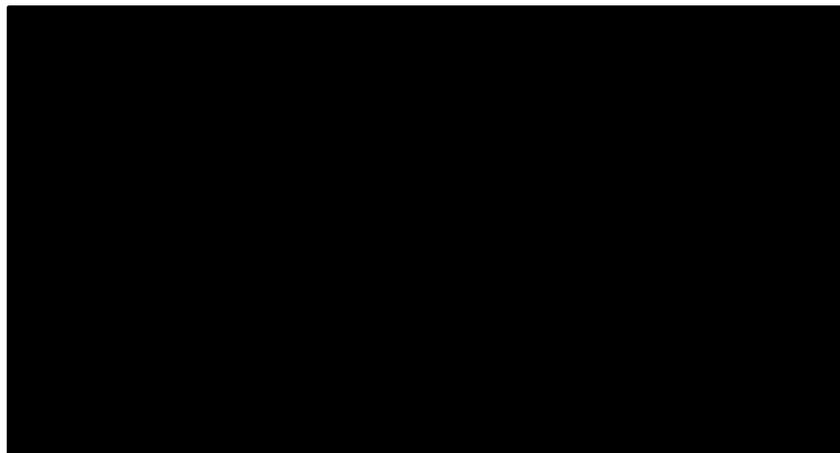


Figura 10. Proceso de Bioventing

Fuente: Técnicas de remediación del suelo tratamientos físico-químicos (Khan et., 2004).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> •Es altamente efectiva para tratar contaminaciones con compuestos de baja presión de vapor (menos de 1 mmHg), y su tasa de degradación es mucho mayor que la volatilización. •Como todos los tratamientos in situ, los costos de excavación son altos el bioventeo llega a ser una de las alternativas económicas ya que no requiere de un área adicional o el uso de maquinaria pesada para llevar acabo el tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tipo y concentración del contaminante. •Pérdida de nutrientes en el subsuelo. •Bajo contenido de humedad del suelo y la dificultad de lograr el caudal de aire a través de la zona contaminada; por ello requiere características especiales del suelo en cuanto a humedad, porosidad, conductividad hidráulica, etc. •Requiere largos períodos de tiempo para obtener la concentración final de hidrocarburos deseada. Los tiempos de limpieza pueden durar de meses a años.

Gráfico 1. Ventajas y desventajas de Bioventing.

Fuente: Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos (Torres & Zuluaga, 2009).

Editada por: Karen Yagual, 2020.

Para la aplicación del tratamiento de bioventeo en el suelo se deben considerar las siguientes condiciones (Arroyo, Quesada & Manuel):

<p>Se degradarán más fácilmente las moléculas más pequeñas (hasta C20), siendo más fácilmente biodegradables los compuestos parafinados o de cadena lineal que los compuestos aromáticos. En general, son favorables los compuestos de alta volatilidad (presión de vapor mayor de 10 mm de Hg a 20°C).</p>
<p>Los suelos deben contener bajos contenidos en arcilla y ser lo más homogéneamente posible, con un valor de permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10} \text{ cm}^2$).</p>
<p>El principal problema es la biodisponibilidad de los microorganismos. Cuanto menor es la solubilidad de los contaminantes menor será la biodisponibilidad.</p>
<p>Los aportes de oxígeno deben ser suficientes, así como la existencia de fuentes de carbono, aceptores de electrones y energía suficientes.</p>
<p>Existen condiciones óptimas tales como: pH 6 y 8, Humedad 12 y 30% en peso, Potencial redox mayor -50 milivoltios, Temperatura: 0 y 40 °C, Relación de los nutrientes N: P de 10:1.</p>
<p>No debe encontrarse contaminante libre flotante sobre el nivel freático</p>

Gráfico 5. Condiciones para la aplicación del tratamiento de bioventeo.

Fuente: Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos (Arroyo, Quesada & Manuel).

Editada por: Karen Yagual, 2020.

Aplicación

Esta técnica es aplicable en suelos afectados por compuestos orgánicos biodegradables que tienen una presión de vapor igual o mayor a 100 N/m² y una constante de Henry superior a 0,01. Los hidrocarburos derivados del petróleo en especial los inferiores a 25 carbonos responden a las condiciones mencionadas y de la misma manera ciertos hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros (de 2 anillos) y disolventes no clorados. No obstante, para que el bioventing se aplique a los derivados ligeros del petróleo, éstos deben encontrarse en estado vapor en la zona no saturada del suelo.

Por otro lado, concentraciones muy altas de contaminantes orgánicos (superiores a 10.000 mg/kg) provocan un efecto negativo con respecto a la disponibilidad de la materia orgánica

para los microorganismos, ralentizando el proceso de biodegradación. Aunque no es ideal para suelos que contienen contaminantes inorgánicos, la bioventilación puede ocasionar la acumulación, adsorción y concentración de los mismos en micro y macroorganismos por lo que podría ser aplicable como pretratamiento del suelo contaminado. La aplicación de esta técnica todavía en fase experimental (Kaifer, Aguilar, Arana, Balseiro, Torá, Caleyá & Pijs, 2006).

2. Biosparging

Es una técnica diferente al bioventing. Esta técnica se basa en la aplicación de aire permitiendo extraer volátiles orgánicos que a su vez ayudan a estimular la biodegradación por medio de organismos autóctonos.

El biosparging se lleva a cabo mediante la inyección de aire a alto caudal, esto se realiza en la zona saturada del suelo, por otra parte se recomienda en ciertos casos disminuir el caudal de inyección de aire, de tal forma que en lugar de favorecer la rapidez de volatilización de los contaminantes, más bien ayudara a la biodegradación de los mismos utilizando la inyección de aire como fuente de oxígeno para potenciar la acción bacteriana (Arroyo, Quesada & Manuel).



Figura 11. Proceso de Biosparging

Fuente: Remediación del derrame de crudo en el recinto Winchele desde una perspectiva ambiental y social (Celorio, 2016).

Aplicación

Se aplica esta técnica en aguas subterráneas y suelos contaminados con sustancias semivolátiles y volátiles con una presión de vapor de alrededor de 100 N/m² y una constante de Henry superior a 0,01. Los hidrocarburos derivados del petróleo en especial los inferiores a 12 carbonos responden a las condiciones mencionadas y de la misma manera ciertos hidrocarburos

aromáticos policíclicos ligeros (de 2 anillos), los compuestos organoclorados volátiles y ciertos disolventes no clorados. Debido a que tratan procesos biológicos, se pueden degradar compuestos de hasta 30 carbonos. Esta técnica no es recomendable para el tratamiento de las fracciones pesadas derivadas del petróleo (> C25), PCBs, metales o dioxinas.

La aplicación de biosparging depende de la permeabilidad del suelo, ya sea por la tasa de transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa hasta la fase acuosa, microorganismos y biodegradabilidad de los contaminantes. Al tratarse de la biodegradación de los contaminantes se pueden mencionar algunos factores que condicionan el rendimiento del mismo: velocidad del proceso de biodegradación, que depende del tipo de contaminante que se presente, características del suelo (permeabilidad, tamaño de las partículas, humedad, entre otras) y por último la temperatura. Aparte de esos factores se puede mencionar el rango de pH apropiado para la aplicación de esta técnica está entre 6 y 8 (Arroyo, Quesada & Manuel).

2. Fitorremediación

Se basa en utilizar plantas para estabilizar, remover, concentrar, transferir y/o eliminar contaminantes (orgánicos e inorgánicos) presentes en el suelo, ya que las raíces de una planta tienen la posibilidad extraer los contaminantes del suelo o también por las poblaciones microbianas asociadas y, debido a esto se considera una técnica muy económica y poco invasiva dentro del ambiente.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Esta técnica se puede aplicar tanto in situ o ex situ. • Se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, se disminuye la diseminación de contaminados a través del aire o del agua. • Es una tecnología sustentable. • Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos. • Es de bajo costo. • No requiere personal especializado para su manejo. • Es poco perjudicial para el ambiente. • Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal. • Evita la excavación y el tráfico pesado. • Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento. • Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta. • El crecimiento de la planta está limitada por concentraciones tóxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminación. • En la fitovolatilización los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente. • Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión. • No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras. • La solubilidad de algunos contaminantes pueden incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.

Gráfico 6. Ventajas y desventajas de fitorremediación.

Fuente: Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez & Acevedo, 2011).

Editada por: Karen Yagual, 2020.

Los principales mecanismos de la fitorremediación son los siguientes:

1. Fitoextracción.

Este método es también conocido como fitoacumulación, consiste en la absorción de los metales contaminados mediante las raíces y se acumulan en tallos y hojas, utilizan plantas que permitan extraer, transportar y concentrar los contaminantes del suelo en partes cosechables de la planta (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez & Acevedo, 2011).

2. Fitodegradación.

Se aplican plantas que generan enzimas capaces de transformar los contaminantes (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007).

3. Fitovolatilización.

Emplea plantas pueden absorber ciertos metales, convertirlos en compuestos volátiles y después eliminarlos por evapotranspiración (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez & Acevedo, 2011).

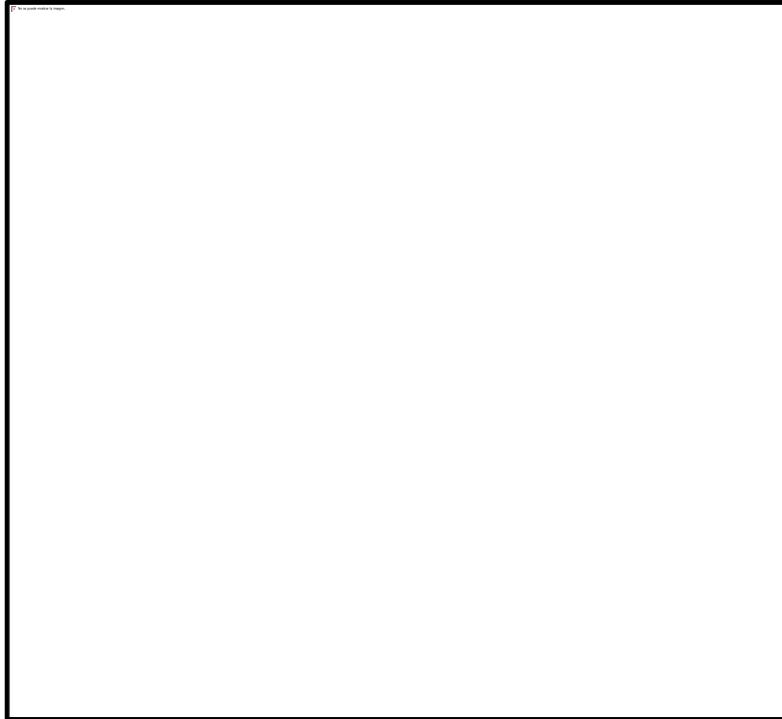


Figura 12. Mecanismos de la fitorremediación

Fuente: Buchanan et al., *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*, 2000.

Aplicación

La fitorremediación puede tratar varios contaminantes como metales pesados (cadmio, cobre, plomo, arsénico, selenio, entre otros), pesticidas, disolventes, hidrocarburos pesados derivados del petróleo y PAHs. Las altas concentraciones de contaminantes tienden a ejercer efectos tóxicos e incluso inhibir el crecimiento de las plantas.

Por lo tanto la fitorremediación en aplicaciones in situ es utilizada cuando la contaminación se limita a capas superficiales del suelo de 0,5 – 1 m de profundidad. En cambio para aplicaciones ex situ las limitaciones de profundidad de tratamiento también se deben tener en cuenta las dimensiones de la superficie.

La aplicación de esta técnica depende del tipo de suelo, presencia de compuestos tóxicos para las plantas y la profundidad de la contaminación como ya se lo menciono anteriormente, en todo caso esta aplicación se realiza en varias fases, tales como se los menciona en manual de control de tratamiento de recuperación de suelos (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007):

4. **Cultivo hidropónico.** En primer lugar, se hacen germinar las plantas a ensayar sobre un medio acuoso contaminado con el fin de determinar la capacidad de acumulación de los contaminantes y las zonas donde éstos se acumulan.
5. **Cultivo de las plantas en substrato inerte.** El siguiente paso es plantar la especie escogida en un suelo inerte previamente contaminado, para conocer el transporte de metales a través de las mismas.
6. **Cultivo en suelo contaminado.** En esta fase se reproduce la etapa anterior utilizando el suelo del área afectada.
7. **Aplicación a gran escala.** Por último, se procede al cultivo de la planta escogida en los suelos contaminados. Es necesario realizar un análisis periódico para evaluar la descontaminación del suelo y la bioacumulación en las distintas partes de los vegetales.

1. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos se relacionan con alguna de las técnicas físico – químicas que anteriormente se han mencionado, y son combinadas con medios de calentamiento del suelo que permite la eliminación de los contaminantes.

Estas técnicas son más rápidas que las anteriores, pero a su vez su costo se incrementa debido a la necesidad de un mayor aporte energético y la utilización de equipos más costosos.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Permite tiempos rápidos de limpieza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es el grupo de tratamientos más costosos. • los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo. • intensivos en mano de obra y capital.

Gráfico 7. Ventajas y desventajas del tratamiento térmicos.

Fuente: Tecnologías de remediación (INECC, 2004).

Editada por: Karen Yagual, 2020.

1. Arrastre con vapor de agua o aire caliente

El principio de esta técnica se basa en inyectar un gas para barrer a los contaminantes, en general se utiliza vapor de agua y aire. El aire se introduce desde la superficie del terreno y por lo tanto su circulación es forzada al succionarlo a través de unos pozos que se excavan como

se muestra en la gráfica. Se recomienda la superficie del terreno con arcilla, plástico, cemento, asfalto, etc., cuando se inyecta aire o un gas sobre la superficie del suelo o a través de pozos.

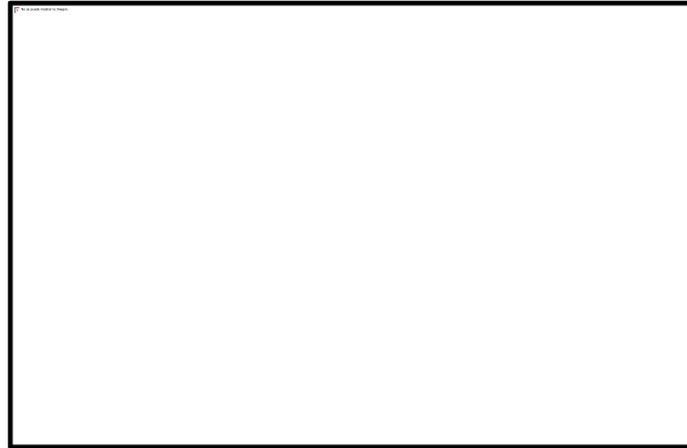


Figura 13. Esquema del proceso de depuración de un suelo por aire.
Fuente: Descontaminación de suelos contaminados (Domenech & Miraguano, 1995).

En otros casos, cuando la presión de vapor de los contaminantes es muy baja para seguir con la eliminación mediante la técnica de extracción de vapores del suelo (SVE), se puede aplicar el tratamiento que utiliza aire caliente o vapor de agua para el arrastre de los compuestos.

Por medio del calentamiento del suelo causado por la inyección en el mismo de vapor de agua se logra aumentar la eficiencia de la depuración, mediante el aumento de presiones de vapor de las sustancias contaminantes. En la inyección de vapor, el suelo genera un frente de condensación que alcanza temperaturas de 100°C.

2. Vaporización mediante calentamiento

Este tratamiento térmico utiliza un sistema de calentamiento del suelo para la extracción de vapores del suelo, también emplea calor para destruir o transformar los contaminantes de interés.

Estos procesos, a través del control de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, convierten los materiales peligrosos en dióxido de carbono, agua y otros productos de combustión. Por otra parte, la combustión de los contaminantes se consigue sometiendo al suelo a altas temperaturas (1000°C).

El tratamiento se desarrolla en dos fases. En la primera se oxida la mayor parte de los contaminantes y en la segunda fase se mantiene al suelo a altas temperaturas durante el tiempo

necesario para conseguir la destrucción completa de los contaminantes y se eliminen todos los gases (Beall, Razo & Serna, 2011).

En la siguiente tabla se mencionan las características.

Tabla 5. Características de aplicación

Características de vaporización mediante calentamiento
Busca la destrucción de los contaminantes mediante el suministro de calor
Se trata de un tratamiento ex situ.
Un inconveniente es la emisión incontrolada de partículas o vapores provocada por la excavación y la dificultad de llevarla a cabo si la contaminación se extiende cerca de tuberías, líneas eléctricas o cimentaciones de edificios.
A pesar de todos estos inconvenientes los tratamientos ex situ todavía se utilizan con cierta asiduidad porque la excavación es fácil de llevar a cabo, puede ser efectuada rápidamente y es capaz de eliminar la contaminación de forma clara y demostrable, garantizando la ausencia de responsabilidad legal en el futuro
Para depurar los gases residuales se incorpora un sistema de limpieza.
Estos métodos presentan el inconveniente de que el suelo queda completamente transformado, sin materia orgánica, sin microorganismos, sin disoluciones

**Fuente: Contaminación de suelo. Tratamiento térmico (Beall, Razo & Serna, 2011).
Editada por: Karen Yagual, 2020.**

Aplicación

Es un método muy útil para eliminar la contaminación producida por hidrocarburos poliaromáticos, PBC (policlorobifenilos) y clorofenoles (Beall, Razo & Serna, 2011).

2. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO ON SITE O EX SITU

Estas técnicas son aplicadas cuando el suelo contaminado ha sido excavado y transportado a otro sitio para su respectivo tratamiento. Los tratamientos ex situ se clasifican de acuerdo al sitio donde se valla a implementar, ya sea que se encuentre dentro de la zona contaminado (on site) o se localice en un sitio fuera de su emplazamiento natural (ex situ).

Las técnicas empleadas en un tratamiento on site o ex situ son las siguientes:

1. Tratamientos físico-químicos: extracción química, procesos de oxidoreducción, deshalogenación, lavado de suelos, etc.
2. Tratamientos biológicos: biopilas, compostaje, Landfarming, etc.

3. Tratamientos térmicos: incineración, pirolisis, desorción térmica, etc.

1. TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS EX SITU

Los tratamientos ex situ tienen la misma función que el proceso in situ de reducir, eliminar o contener la contaminación, por otra parte el tratamiento suele aplicar menos tiempo de descontaminación que el anterior tratamiento, siendo uniforme y homogénea.

1. Lavado del suelo

El suelo excavado se trata en un tanque con una solución acuosa. Para poder separar las fracciones más gruesas generalmente, superiores a los 20 mm de diámetro se debe tamizar. Los materiales finos deben ser mezclados con un fluido lavador para posteriormente ser aclarados. Luego se dividen las arenas, en especial las que tienen una capacidad para retener contaminantes muy baja. Los materiales que continúan con el proceso de depuración son las arcillas y los limos. Finalmente, los que aun conserven porcentaje alto de contaminantes son separados para aislarlos en vertederos controlados. En ciertas ocasiones se emplea agua con disolventes para permitir la extracción. También se emplean detergentes para extraer contaminantes con comportamientos hidrofóbicos (Chanapí, Hernández, Vega & Villate, 2013).

Pueden emplearse dos estrategias operativas:

- Disolver o mantener en suspensión las partículas finas del suelo en el seno de la disolución acuosa de lavado.
- Concentrar la fracción fina por separación física, depositándose en el propio emplazamiento las fracciones más gruesas y menos contaminadas.

Gráfico 8. Características de lavado del suelo.

**Fuente: Contaminación de suelo y agua subterráneas (Darlo JD, 2019).
Editada por: Karen Yagual, 2020.**

Aplicación

Esta técnica es útil para una amplia gama de compuestos contaminantes como los metales pesados, cianuros metálicos, disolventes nitrogenados, hidrocarburos aromáticos, gasolinas, aceites minerales, PBC (productos organoclorados, como los policlorobifenilos), etc. Los fluidos utilizados son muy diversos dependiendo del tipo de contaminante: agua, disoluciones

acuosas, disolventes orgánicos, compuestos quelantes, productos tensos activos, ácidos y bases.

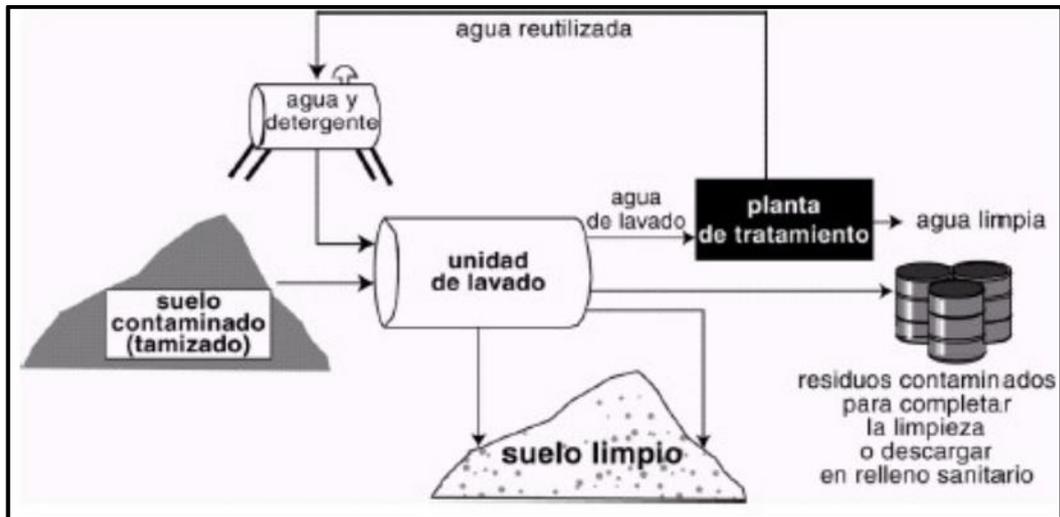


Figura 14. Esquema general del lavado de suelo
 Fuente: Contaminación y remediación del suelo – ingeniero ambiental, 1995.

2. Extracción química

Este proceso es similar al anterior con la diferencia que, en vez de utilizar una solución acuosa, se utiliza uno o varios extractantes adecuados a los contaminantes a tratar, mezclándolos con el suelo contaminado en un sistema de extracción.

La extracción con disolventes es una técnica de tratamiento ex situ que consiste en usar un disolvente para separar o retirar contaminantes orgánico peligroso de fangos residuales, sedimentos o tierra. La extracción con disolventes no destruye los contaminantes, sino que los concentra, para que sea más fácil reciclarlos o destruirlos con otra técnica (Conde Gabriel).

Diferentes tipos de reactivos:	
Extracción ácida. Se utilizan ácidos para extraer metales pesados de los suelos contaminados.	Extracción con solventes. Se usan disolvente orgánico como extractante.

Gráfico 9. Características de lavado del suelo.
 Fuente: Contaminación de suelo y agua subterráneas (Darlo JD, 2019).
 Editada por: Karen Yagual, 2020.

Aplicación

La extracción con disolventes se utiliza para tratar sedimentos, lodos y suelos. Los contaminantes pueden ser compuestos orgánicos tales como PCB's, compuestos orgánicos volátiles no halogenados, disolventes halogenados y residuos derivados del petróleo.

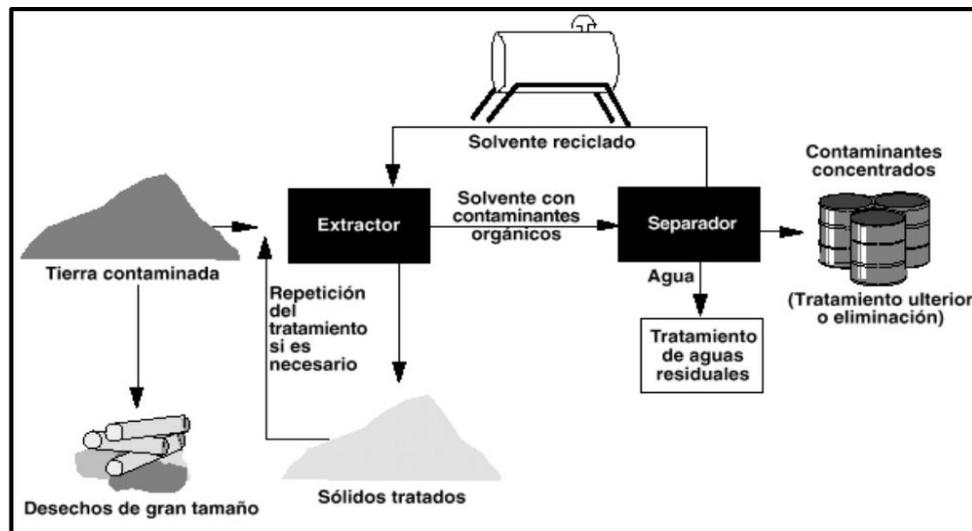


Figura 15. Esquema general de la extracción con disolventes.

Fuente: Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos (Riesco, 2012).

3. Tratamientos Redox

Los tratamientos redox permiten conocer la concentración de disolución de cualquier sustancia y saber si actúa como oxidante o reductor. En una valoración redox se utiliza un indicador redox, tiene un cambio de color y un potenciómetro que permite conocer el punto de equivalencia o punto final.

Esta técnica consiste en la aplicación de procesos de oxidación – reducción que transforman los contaminantes peligrosos en sustancias menos tóxicas.

Es aplicable para sustancias inorgánicas como cianuros y cromatos y es menos eficaz para el tratamiento de la mayor parte de compuestos orgánicos.

2. TRATAMIENTOS TÉRMICOS EX SITU

En los tratamientos térmicos ex situ, los suelos excavados son sometidos a altas temperaturas con el fin de eliminar o reducir la contaminación. Su aplicación es más rápida y más costosa.

1. Desorción térmica

Es un proceso que se basa en usar un intercambio de calor indirecto o directo, permitiendo calentar los contaminantes orgánicos a temperaturas sumamente altas, por lo tanto se volatiliza y separa del sólido contaminado.

La desorción térmica tiene dos pasos fundamentales:

1. Calentamiento del material contaminado para volatilizar los contaminantes orgánicos.
2. Tratamiento de la corriente de gas producida para prevenir las emisiones de los contaminantes volatilizados a la atmósfera.

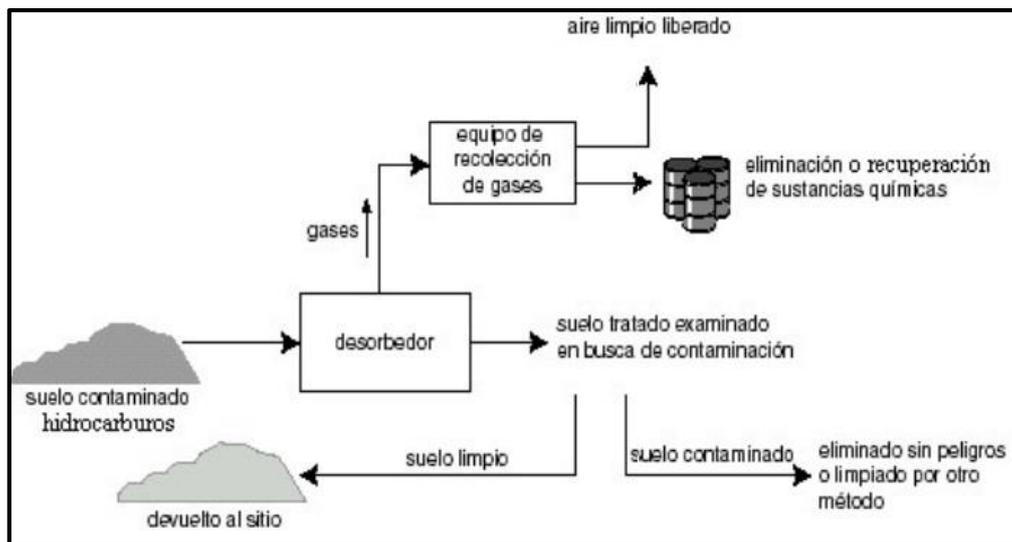


Figura 16. Esquema general de la desorción térmica

Fuente: Contaminación y remediación del suelo – ingeniero ambiental, 1995.

1. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos ex situ utilizan los mismos fundamentos que los in situ, por otra parte este tratamiento es costoso al excavar los suelos. Se pueden mencionar el landfarming, las biopilas y el compostaje.

1. Landfarming

Es uno de los tratamientos con más antigüedad aplicado a suelos contaminados. Una vez realizada la excavación, consiste en aplicar un pre tratamiento biológico con microorganismos que reduce la concentración de hidrocarburos y acelera el proceso de degradación.

Debido a que es un procedimiento ex situ, del suelo a tratar es trasladado a un terreno que debe ser totalmente plano, tratados en espacio abierto y con un fondo compuesto por una capa de arcilla, evitando que el contaminante se filtre (Celorio, 2016).

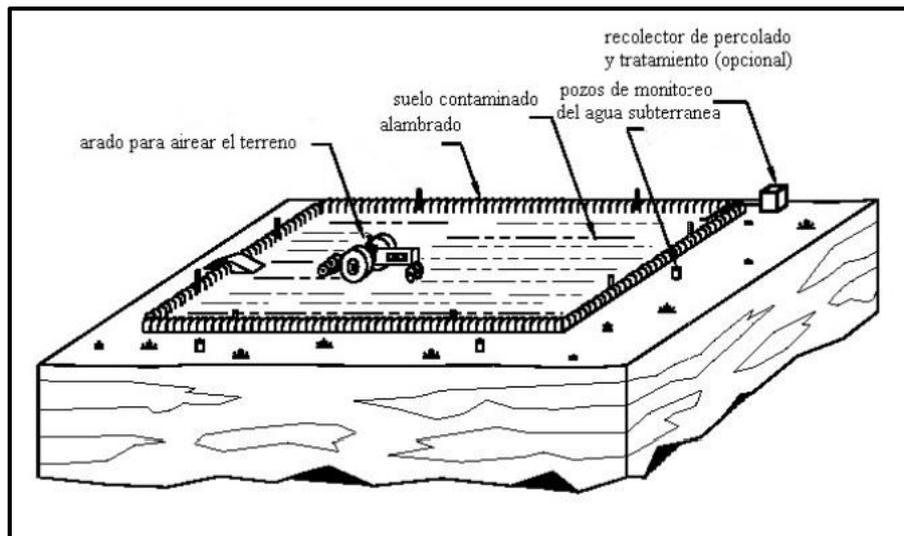


Figura 17. Proceso de Landfarming

Fuente: Contaminación y remediación del suelo – Ingeniero ambiental (EPA, 1995).

Aplicación

La técnica consiste en excavar el suelo y se dispone una capa de tierra cuya profundidad no debe exceder los 50-60 cm de espesor sobre la superficie del lugar donde se realiza la recuperación y se estimula la actividad microbiana aeróbica mediante aireación, es decir, se realiza un proceso de arado del terreno donde se puedan desarrollar las bacterias, se procede añadir abono para proveer de nitratos o fosfatos y activar el crecimiento de los microorganismos. Se utiliza carbonato de cálcico para mantener un pH del suelo de 6 a 8.

2. Biopilas

Las biopilas también llamadas bioceldas, biomontículos o pilas de composteo, son utilizadas para biodegradar compuestos del petróleo. La biopilas se definen como un proceso biológico controlado, en el cual los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados.

Esta técnica consiste en la formación de montones o pilas con el suelo contaminado y se estimula la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes, minerales y agua, condiciones favorables para la biodegradación de los contaminantes. Las biopilas se parecen al Landfarming pero tienen como diferencia la aireación del material, que no se realiza arando el terreno sino forzando la circulación del aire, es decir, el aire se inyecta o extrae por medio de tubos perforados o ranurados que atraviesan la pila.

Estas pilas una vez construidas se deben cubrir de plástico para prevenir la volatilización de HTP, la escorrentía y la evaporación y para promover el calentamiento del sol. Al formar estas pilas o montones de suelo no suelen exceder de 2 a 3 m máximo.

Iturbe, Flores, Chávez & Roldán, (2001) señalan que la efectividad de las biopilas depende de los siguientes factores:

1. Características del suelo.
2. Características de los contaminantes.
3. Condiciones climatológicas

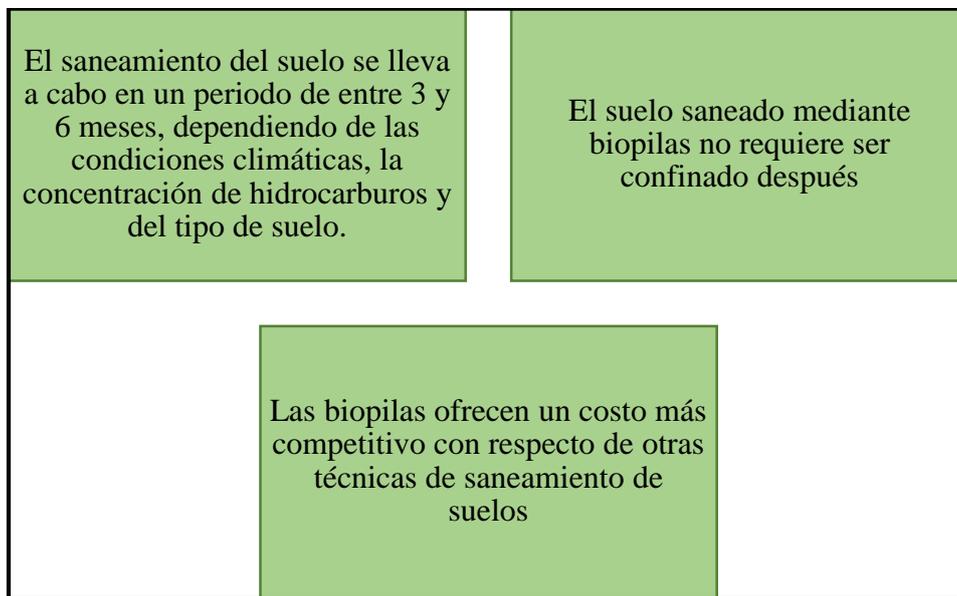


Gráfico 10. Características de biopilas.

Fuente: Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas (Iturbe, Flores, Chávez & Roldán, 2001).

Editada por: Karen Yagual, 2020.

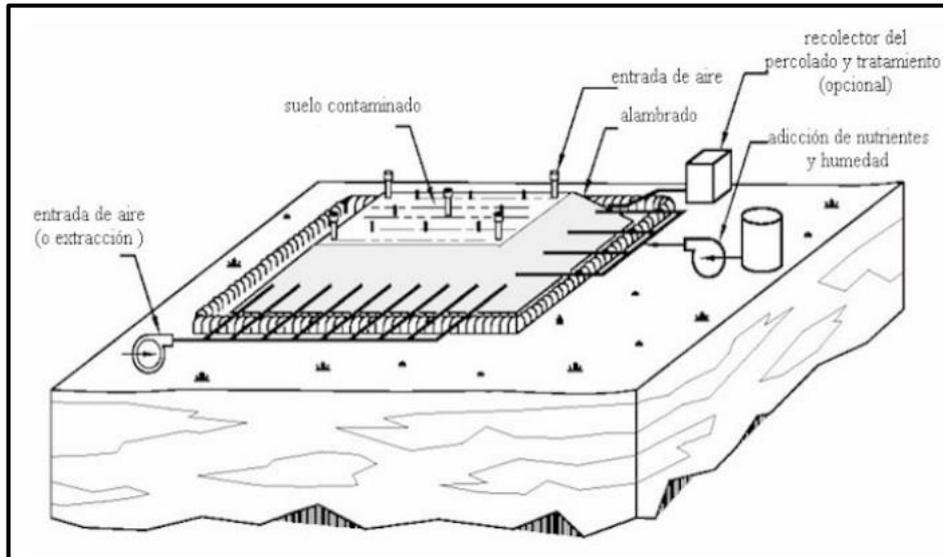


Figura 18. Esquema del proceso de remediación con biopilas.
Fuente: Contaminación y remediación del suelo

1. Compostaje

El compostaje es un proceso biológico que consiste en estimular la actividad biodegradadora, aerobia y anaerobia, y se trata a los suelos contaminados con una mezcla de elementos orgánicos sólidos tales como abono, paja, aserrín, estiércol y otros desechos agrícolas, permitiendo transformar los compuestos orgánicos tóxicos en sustancias inofensivas.

Para ello, al iniciar con el tratamiento se excava el sitio contaminado por crudo, luego este suelo contaminado es trasladado hasta la zona donde se realizara su respectivo tratamiento que consiste de una pista impermeabilizada, dando inicio al tratamiento. Posteriormente los residuos contaminados son mezclados con residuos animales o vegetales, proporcionando una porosidad óptima y un balance de carbono y nitrógeno.

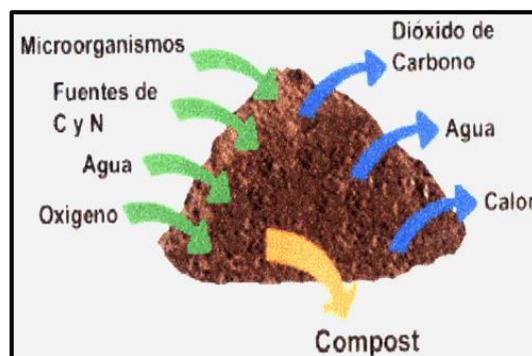


Figura 19. Formación del compost

Fuente: Remediación del derrame de crudo en el recinto Winchele desde una perspectiva ambiental y social (Celorio, 2016).

Existen tres posibles diseños del tratamiento de compostaje, los cuales son:

Pilas estáticas aireadas, consiste en que el suelo es apilado en montones para que se airean mediante soplantes o bombas de vacío que son distribuidas en el interior de las pilas.

Pilas mecánicamente agitadas, el suelo se coloca en reactores donde se mezclara mecánicamente para obtener la aireación.

Windrow composting, se basa en colocar montones alargados que se mezclan periódicamente con equipos móviles, es una de las alternativas más utilizadas y rentables.

2. TÉCNICAS DE PUESTA EN CONTACTO

La técnica de puesta en contacto se trata de facilitar el contacto de los agentes de tratamiento ya sean estos de agua, sustancias químicas, etc., con los contaminantes. Una de las variables más importante de esta técnica es el Kerfing de la cual hablaremos a continuación.

1. Kerfing

Kerfing, consiste en la realización de una cavidad paralela o perpendicular a un pozo o sondeo mediante un chorro de agua a elevadas presiones, para que actúe como canal de recogida o como barrera para facilitar las tareas de recuperación. Para ello en la cavidad formada se puede llevar rellenar con:

1. Material permeable, actúa como canal de recogida.
2. Material impermeable, actúa como barrera.
3. Agente descontaminante, ayuda la recuperación del suelo.

La técnica de kerfing es una técnica que nos permite reducir las contaminaciones en los alrededores de los pozos que usan un método de producción diferente como los son el de Swab o en caso de la realización de un mantenimiento al sistema de producción como lo es el Balancín.

1. TÉCNICAS DE EXCAVACIÓN Y DEPÓSITO FINAL

Estas técnicas consisten en operaciones donde el suelo contaminado es excavado y llevado a la zona de almacenamiento. Por otra parte se realiza el saneamiento de los espacios contaminados mediante la excavación y la retirada de los contaminantes del suelo. Además se puede realizar

una excavación selectiva que permita minimizar la mezcla de terrenos o los minerales que tenga la naturaleza.

En este tipo de actuación es segura para la eliminación de la contaminación del emplazamiento y por ende es de gran rapidez. Requiere de excavaciones extensas y que el transporte movilice grandes cantidades de suelo contaminado hasta el lugar adecuado y esto genera mayores costos.

Al realizar una excavación de un suelo contaminado se debe tener en cuenta varias condiciones, tales como:

1. Riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores.
2. Distancia al punto de vertido.
3. Características hidrogeológicas de la zona a excavar. Si el nivel freático está muy somero no optaríamos por excavación.
4. Condiciones climatológicas. Las lluvias importantes o situaciones climatológicas adversas, dificultan seriamente la excavación de ciertos suelos.
5. Características del lugar escogido para el depósito final. El emplazamiento definitivo debe ser estudiado y tener las condiciones adecuadas, para que no existan problemas de contaminación futuras en la nueva localización.

1. ATENUACIÓN NATURAL

La atenuación natural consiste en la reducción de las concentraciones de los contaminantes sin la participación del hombre. Es definida como un conjunto de procesos biológicos, químicos y físicos que se desarrollan de manera natural y ayudan a la transformación o destrucción de los compuestos químicos indeseables para el medio ambiente.

A diferencia de los otros procesos de remediación, la atenuación natural no requiere de obras de ingeniería, sino que está garantizada por estudios previos exhaustivos, es decir, análisis de factibilidad in vitro-laboratorio que permita el logro de objetivos de limpieza.

La atenuación natural consiste en utilizar procesos naturales para contener la propagación de la contaminación. Los procesos naturales que se utilizan para la recuperación son biológicos como la biodegradación aerobia, anaerobia y co-metabólica, también están los procesos físico

- químicos como la dilución, dispersión, volatilización, adsorción, biodegradación, entre otras que ayudaran de alguna forma a la disminución de la contaminación.

Los principales organismos degradadores de los hidrocarburos dentro de este proceso son las bacterias, levaduras, hongos, etc. Cuando ocurre un derrame de crudo las fracciones más volátiles se evaporan con rapidez permitiendo que solo queden los componentes alifáticos y aromáticos de cadenas largas, de los cuales estas serán atacadas por microorganismos del suelo.

En este caso Kaifer y sus colaboradores (2004), mencionan que la atenuación natural debe tomar en cuenta ciertos factores que son los siguientes:

1. Protección de receptores potenciales durante el proceso.
2. Condiciones geológicas y geoquímicas favorables.
3. Reducción de contaminantes probada y documentada en un plazo de tiempo razonable.
4. Confirmación en estudios microbiológicos de la degradación del contaminante.
5. Asegurar la contención de los contaminantes residuales, tanto durante como después del proceso.

La atenuación natural también toma en cuenta lo que no debe utilizarse cuando se presenta estas circunstancias:

1. Concentraciones de hidrocarburos totales del petróleo que superen 10.000 ppm.
2. Existe presencia de contaminación en fase libre.
3. Hay potenciales receptores en el entorno del emplazamiento que pueden alcanzar los contaminantes antes de que se degraden por procesos naturales.
4. Existe la posibilidad de que la migración de los contaminantes los disperse en un ámbito espacial amplio antes de degradarse. Esto puede ocurrir en suelos muy permeables o fracturados. Se recomienda evitar el uso aislado de la atenuación natural en suelos con conductividades hidráulicas superiores a 10^{-6} m/s

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA: DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA Y EXTRACCIÓN DEL CRUDO DEL SUELO

1. UBICACIÓN

La presente investigación se desarrolló en Ecuador en el Cantón Salinas de la Provincia de Santa Elena en los sectores Valparaíso, Costa de Oro y Santa Rosa.



Figura 20. Ubicación geográfica del área de estudio.

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

La toma de muestras tuvo la finalidad de seleccionar el área de interés, para el estudio de técnicas de remediación de suelos contaminados, en función de observaciones realizadas en las salidas de campo preliminares, teniendo en cuenta para la selección de las zonas de estudio la

presencia de pozos, las emanaciones naturales, el área de suelo afectado, entre otras. Una vez identificada la zona de interés, por medio de un muestreo estratificado se eligieron las más adecuadas.

Se realizó la elección de tres sitios que presentaban contaminación por derrames de petróleo y en tres suelos con características diferentes, a diferentes profundidades en los tres sitios. Entre los lugares de visitas se consideraron los siguientes:

Tabla 6.
sitios de
de suelo.

N° ZONA	SECTOR	MUESTRA DE SUELO
Zona 1	Valparaíso	POZO VA 10
		AFLORAMIENTO 1
		POZO SPA 0079
		POZO SPA 0081
		POZO SPA 0085
		POZO SPA CH1
Zona 2	Costa de Oro	POZO SRA 056
Zona 3	Santa Rosa	POZO PETROPOLIS 0113

Diferentes
muestreo

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

En total fueron colectadas 8 muestras de suelo, con una pala recta. La descripción de los sitios de muestreo se presenta a continuación.

1. Zona 1 - Sector Valparaíso

En esta zona se observó contaminación de suelo por derrame de crudo en los alrededores de los pozos petroleros. También se identificaron afloramientos naturales que están afectando de manera directa o indirecta los alrededores. (Ver ANEXO 1)



Figura 21. Identificación de la zona de muestreo del sector Valparaíso.
Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

2. Zona 2 - Sector Costa de Oro

En esta área se encontró contaminación de suelo por crudo en los alrededores del área de producción petrolera, ya sean estos por daños mecánicos de los pozos petroleros o por asentamientos natural del mismo, afectando de manera indirecta o directa los alrededores del sector.



Figura 22. Identificación de la zona de muestreo del sector Costa de Oro.
Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

3. Zona 3 - Sector Santa Rosa

En este punto se encontró contaminación de suelo por derrame de crudo en los alrededores de los pozos petrolero que afectan de manera indirecta o directa a los habitantes, ocasionando un impacto ambiental que perjudica al ecosistema terrestre y marino. (Ver ANEXO 1)



Figura 23. Identificación de la zona de muestreo del sector Santa Rosa.
Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

2. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA TEXTURA DEL SUELO

1. Determinación de la textura del suelo mediante el método del “Tacto”.

Existen varios métodos para la determinación de la textura del suelo que suelen ser bastantes largos, pero para una clasificación rápida o sencilla se llevó a cabo el método del tacto, que permite conocer a grandes rasgos el grupo textural de las muestras (Nadal, 1978. Escuredo ET Al., 1983; Del Carmen, 1984; Hereter ET Al., 1988).

Este método consiste en humedecer y frotar la muestra de suelo entre el pulgar y los otros dedos hasta formar una pasta homogénea. Se presiona la muestra hasta formar una cinta, en la cual se observará un brillo, si la cinta es lisa, escamosa o el tacto es áspero.

Si la muestra es arenosa no se forma una cinta, el tacto es áspero, no tiene brillo ni cohesión. Si el tacto es suave, se forma una cinta escamosa y no presenta pegajosidad ni plasticidad podemos decir que es una muestra limosa. En cambio, sí se forma la cinta o anillo, es brillante, plástica o pegajosa según el contenido de humedad entonces decimos que es una muestra arcillosa (Molera & Llitjós, 1995).

1. Materiales

Tamiz 2mm

Muestras de Suelos

2. Reactivos

Agua destilada

3. Procedimiento

Según la prueba de FAO se sigue el siguiente procedimiento.

1. En primer lugar, se coloca una pequeña cantidad de suelo en el tamiz para separar las gravas y piedras a 2mm.



Figura 24. Proceso de tamizado de la muestra de suelo Pozo VA 10.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de suelo UPSE, 2020.

2. Se toma una cantidad aproximada de suelo en la palma de la mano, agregando un poco de agua (gota a gota) para humedecer la muestra. Se amasa el suelo para poder disolver todos los agregados.



Figura 25. Humedecer la muestra de suelo Pozo VA 10.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de suelo UPSE, 2020.

3. Después se amasa la muestra del suelo hasta formar una bolita de 2,5 cm de diámetro en la palma de la mano.



Figura 26. Formar una bola de 2,5 cm de diámetro de la muestra de suelo.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de suelo UPSE, 2020.

4. Si la bola no se mantiene, es decir, se deshace la muestra es una *arena*.
5. Si se mantiene la forma, se intenta hacer un cilindro de 1 cm de diámetro. Si no es posible la textura es *arenoso franco*.

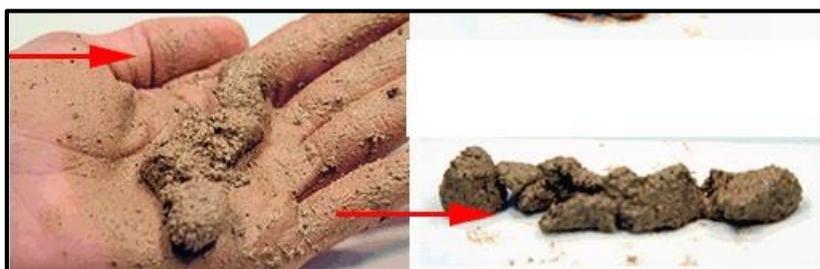


Figura 27. Textura de suelo Arenoso Franco.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de suelo UPSE, 2020.

6. Si esto se consigue, se continúa amasando el cilindro hasta que alcance una longitud mayor a la anterior. Si no se mantiene se trata de una muestra *franco arenoso*.



Figura 28. Textura de suelo Franco Arenoso.

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de suelo UPSE, 2020.

7. Posteriormente si se consigue mantener la forma, se intenta doblar el cilindro hasta formar un semicírculo. Si no es posible es *franco*.



Figura 29. Textura de suelo Franco.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

8. Si se consigue el paso anterior, seguimos doblando el cilindro hasta formar un círculo cerrado. En caso de no ser posible se trata de *franco pesado*.
9. Si la muestra se mantiene y se forman grietas ligeras es *limo*.
10. Si el círculo es doblado y no se agrieta es *arcilla*.

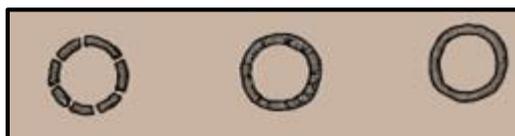


Figura 30. Textura de suelo Franco Pesado, Limo y Arcilla.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

1. METODOLOGÍA DE LA EXTRACCIÓN DEL CRUDO DE UN SUELO CONTAMINADO

1. Desarrollo del proceso de extracción de crudo de un suelo contaminado

La extracción es una de las operaciones que permite separar con un líquido una parte específica de la muestra, este proceso consiste en usar un solvente capaz de disolver otras sustancias y por ende lograr separar o retirar los compuestos de una fase homogénea.

Sin embargo, existen otros factores que se deben tomar en cuenta para llevar a cabo el método extracción Soxhlet, tales como selección del solvente a emplear, las condiciones de operación del sistema y sus propiedades físicas.

En la extracción de Soxhlet vamos a realizar el número de ciclos que sea necesario, con el mismo solvente que se evapora y condensa con el fin de extraer los compuestos contaminantes.

A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la extracción de crudo de un suelo contaminado obteniendo el porcentaje del contenido de las muestras de suelo a temperaturas superiores al del ambiente y por lo tanto recuperar el solvente después de la extracción empleando el rota vapor. Dejando lo más limpio posible el suelo.

1. Materiales

Tabla 7. Equipos de la Extracción de Soxhlet.

EQUIPOS
Soporte universal
Balón de fondo plano (100ml)
Tubo refrigerante
Tubo de Soxhlet
Plancha de calentamiento
Balanza electrónica
Vaso de precipitación
Mangueras
Pinzas
Imanes

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

2. Reactivos

Solvente – Cloroformo

3. Procedimiento

1. Se pesa el papel filtro M_1



Figura 31. Peso del papel filtro.

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

2. En el papel filtro se coloca la cantidad exacta de suelo contaminado con hidrocarburo y se pesa la muestra en la balanza electrónica M_2 .



Figura 32. Peso de la muestra de suelo junto con el papel filtro.

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

3. Luego se restan los datos de M_2 y M_1 para obtener el valor de la masa inicial de la muestra de suelo contaminado con crudo en gramos (M).

$$M = M_2 - M_1$$

4. Se toma un balón de fondo plano de 100 ml con boca esmerilada 24/40 y se procede a pesar el instrumento vacío.



Figura 33. Balón de fondo plano de 100 ml de boca esmerilada 24/40.
 Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

5. Se introduce el agitador magnético o barra magnética dentro del balón y se agrega el solvente con una medida aproximada de 100 ml de cloroformo. En caso de ser necesario se agregar una cantidad mínima durante la operación, ya que puede existir pérdida del solvente por evaporación.

Tabla 8. Propiedades del Cloroformo

PRINCIPALES PROPIEDADES	
Formula	CHCl_3
Peso molecular	119.39 g/mol
Composición	C: 10.05%; H: 0.84% y Cl: 89.10%
Punto de ebullición	61.26 °C
Temperatura critica	263.4 °C

Fuente: Hoja de seguridad VII cloroformo
 Editada por: Karen Yagual, 2020.



Figura 34. Balón de fondo plano con solvente cloroformo.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

6. Se envuelve la muestra en papel de filtro y se coloca en el interior del extractor Soxhlet.



Figura 35. Tubo extractor con la muestra de suelo.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

7. Se procede a montar el equipo de soxhlet para la extracción de crudo.

Partes del equipo:

1. Balón de fondo plano de 100ml
2. Tubo refrigerante
3. Tubo de Soxhlet
4. Mangueras para la circulación de agua para refrigeración
5. Pinzas

6. Soporte universal



Figura 36. Montaje del equipo soxhlet.

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

7. Una vez que el equipo este armado se procede a regular el caudal de agua en el tubo refrigerante.
8. Se enciende la plancha de calentamiento y ajustar la velocidad más baja para ir aumentando progresivamente hasta poder alcanzar los parámetros adecuados (T y Stir) como se muestra en la Tabla 9.



Figura 37. Solvente en la plancha de calentamiento.

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

9. Cuando el cloroformo comienza a evaporarse, asciende hasta la zona de refrigeración, empieza a condensar, al entrar en contacto con los conductos de vidrio que contienen el agua y comienza a caer en gotas sobre el papel filtro en el que está la muestra de suelo.



Figura 38. Evaporación del cloroformo en el extractor.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

10. Cuando el condensado va cayendo sobre el papel filtro, comienza a circular a través de la muestra de suelo, arrastrando los contaminantes, que son solubles en él y va llenando el recipiente de extracción hasta llegar al nivel de la bajada del sifón y por ende hacia el balón inferior. Este ciclo se realiza hasta observar que el solvente tenga un contenido de color claro.



Figura 39. Proceso de extracción de crudo.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

11. En este caso realizamos 4 ciclos de llenado y sifonado del tubo extractor, durando el proceso completo entre 4 – 6 horas.

Tabla 9. Numero de sifones y parámetros de temperatura y stir.

# SIFÓN	T (°C)	STIR (RPM)
1	200	200
2		
3		
4		

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

12. Al finalizar el cuarto ciclo, se da por terminado la operación de extracción. Se espera un cierto tiempo para que el sistema se enfríe.
13. Cuando el sistema esté totalmente frío se retira el soxhlet con cuidado y se extrae el papel de filtro que está saturado de solvente y se coloca en un sitio aireado para que seque la muestra.



Figura 40. Muestra de suelo libre de crudo.

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

14. Para recuperar o remover el solvente del crudo extraído se utiliza un rotavapor.



Figura 41. Muestra de crudo extraído de un suelo.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

El rotavapor consta varias partes que son:

1. Balón de fondo plano de 100ml de la mezcla extraída
2. Balón de recuperación del solvente
3. Refrigerante de serpentín
4. Llave de vacío
5. Motor rotario
6. Tubo evaporador
7. Pinza clip
8. Baño termostático de agua
9. Colocamos el disolvente que se quiere separar y lo sumergimos en un baño de agua hasta la mitad. Se lo sujeta con una pinza evitando que se caiga en el baño de agua
10. Se procede a abrir el agua del refrigerante.
11. Encendemos la calefacción del baño, utilizando una temperatura necesaria para conseguir que gire el matraz y comienza la evaporación del disolvente.

Tabla 10. Condiciones de operación de la temperatura del baño.

HEATING BATH TEMPERATURE

T (°C)	REVOLUCIONES (RPM)
78	80

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

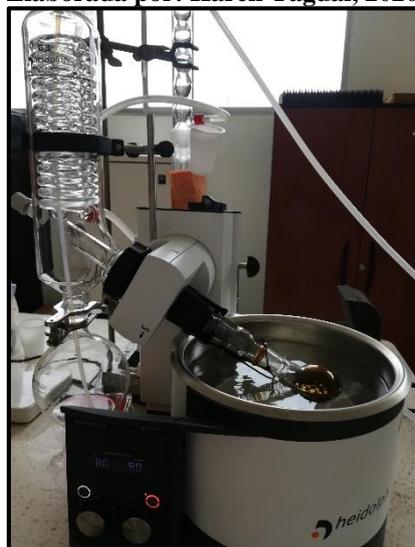


Figura 42. Rotavapor con el disolvente

Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

12. Posteriormente una vez que no se observa condensación de vapores en el matraz colector, se detiene el motor rotatorio y se deja enfriar para retirar el matraz de destilación de la boca del tubo evaporador.
13. Al finalizar el proceso dejamos enfriar la muestra y luego pesamos el balón libre de solvente, para calcular el porcentaje de crudo en la muestra teniendo en cuenta los valores iniciales de la muestra colocada en la extracción.



Figura 43. Muestra de crudo sin solvente.
Elaborada por: Karen Yagual – Laboratorio de petróleo UPSE, 2020.

Porcentaje de crudo en la muestra **CM (%)** se calcula según la siguiente expresión:

$$\mathbf{CM (\%)} = \frac{\mathbf{m_2 - m_1}}{\mathbf{M}} \times \mathbf{100} \quad \mathbf{Ec. 2}$$

Donde:

m₁ = masa en g del matraz de fondo redondo vacío

m₂ = masa en g del matraz de fondo redondo con crudo tras ser evaporada

M = masa de la muestra en g

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo describe los resultados e interpretaciones que se obtuvieron en base a las muestras de suelos contaminados por la actividad hidrocarburífera y emanaciones naturales en diferentes sectores del cantón salinas. Los sectores y pozos que se tomaron a consideración son:

1. Sector Valparaíso
1. POZO VA 10
2. AFLORAMIENTO 1
3. POZO SPA 0079
4. POZO SPA 0081
5. POZO SPA 0085
6. POZO SPA CH1
7. Sector Costa de Oro
8. POZO SRA 056
9. Sector Santa Rosa
10. POZO PETROPOLIS 0113

Las muestras de los sectores que se mencionaron anteriormente se enfocan en el conocimiento de la textura del suelo, el porcentaje de crudo extraído del suelo contaminado y gravedad API, valores obtenidos mediante diferentes pruebas en laboratorio para posteriormente proceder a la selección de las técnicas de tratamiento de suelos. Los resultados y técnicas se detallan a continuación.

1. Resultados de la determinación de la textura de suelo

Los resultados de la determinación textural de las muestras de suelo responden a la cantidad y tamaño de los elementos que lo conforman, por lo tanto es necesario conocer los porcentajes

de las características granulométricas como arena, limo y arcilla, resultados que se reflejan en la Tabla 11.

Tabla 11. Porcentajes de arena, limo y arcilla para cada muestra de suelo.

MUESTRA DE SUELO	PROFUNDIDAD (cm)	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)
POZO VA 10	7.37	65	20	15
AFLORAMIENTO 1	12.19	70	15	15
POZO SPA 0079	9	70	20	10
POZO SPA 0081	5	70	20	10
POZO SPA 0085	4	65	25	10
POZO SPA CH1	6.5	75	20	5
POZO SRA 056	6	45	25	30
POZO PETROPOLIS 0113	8	55	20	25

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

Conforme a los porcentajes de los componentes de cada muestra de suelo, se referencian los valores obtenidos en el triángulo textural (Ver Figura 3) y se analiza la clase de textura a la cual pertenece el suelo, evidenciados en la Tabla 12 con el fin de saber qué tipo de tratamiento de recuperación se puede aplicar.

Tabla 12. Resultados de la determinación textural por el método del tacto.

MUESTRA DE SUELO	CLASE DE TEXTURA
POZO VA 10	Franco arenoso
AFLORAMIENTO 1	Franco arenoso
POZO SPA 0079	Franco arenoso
POZO SPA 0081	Franco arenoso
POZO SPA 0085	Franco arenoso
POZO SPA CH1	Arenoso franco
POZO SRA 056	Franco arcilloso
POZO PETROPOLIS 0113	Franco arcillo arenoso

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

2. Resultados de los porcentajes de crudo extraídos en las muestras de suelos contaminados

Los valores porcentuales de crudo de las 8 muestras de suelos contaminados presentados en la Tabla 13, se determinaron comparando los resultados de la masa original de crudo y la masa original de la muestra de suelo contaminado, aplicando las técnicas de laboratorio descritas anteriormente.

Tabla 13. Resultados de la extracción de crudo de los suelos contaminados.

MUESTRA DE SUELO	Masa del papel filtro M ₁ (g)	Masa muestra con el papel filtro M ₂ (g)	Masa de la muestra M (g)	Masa del matraz vacío m ₁ (g)	Masa del matraz con crudo m ₂ (g)	% Crudo en la muestra $CM (\%) = \frac{m_2 - m_1}{M} \times 100$
POZO ENT 1	0,94	74	73,06	87,3	100,93	18,656
AFLORAMIENTO 1	0,89	66,64	65,75	86,1	93,69	11,544
POZO SPA 0079	0,91	50,07	49,16	84,35	93,6	18,816
POZO SPA 0081	0,94	54,11	53,17	89,81	97,99	15,385
POZO SPA 0085	0,91	58,75	57,84	85,17	93,9	15,093
POZO SPA CH1	0,91	56,81	55,9	87,38	96,17	15,725
POZO SRA 056	0,93	59,94	59,01	82,91	84,51	2,711
POZO PETROPOLIS 0113	0,93	57,15	56,22	88,99	89,27	0,498

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

3. Determinación de la Gravedad API

Se consultó la gravedad API de cada crudo, quedando reflejadas en la Tabla 14. Esto nos permite conocer la densidad del crudo y respecto a esta poder aplicar la técnica de remediación de suelo aplicable a los sectores evaluados del cantón Salinas.

Tabla 14. Gravedad API

MUESTRA DE SUELO	°API
POZO VA 10	24.4
AFLORAMIENTO 1	Liviano
POZO SPA 0079	Liviano
POZO SPA 0081	Liviano
POZO SPA 0085	27.5
POZO SPA CH1	30
POZO SRA 056	36.5
POZO PETROPOLIS 0113	28.4

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

Los crudos que no tienen valores numéricos, debido que no se ha podido consultar bibliográficamente, tienen gravedad API estimada, porque al estar el crudo en contacto con el aire y el proceso de extracción que se ha realizado, se pierde una parte de los volátiles y por ende el dato que se obtiene en el laboratorio será erróneo.

4. Selección del tratamiento a aplicar

La selección del tratamiento que se aplicara a los suelos contaminados se determinará teniendo en cuenta el tipo de suelo, el tipo de contaminante, los factores tecnológicos aplicar, la relación de costo y que la productividad del pozo.

Si la contaminación alrededor de cada pozo es muy pequeña, entonces no se va a tener en cuenta una solución que conlleve una ingeniería complicada, sino un tratamiento biológico, que será in situ o ex situ dependiendo de que el pozo esté operativo o no.

En el caso de realizar un tratamiento in situ se decide optar por dos grupos de tratamientos biológicos: fitorremediación o biorremediación. Estarán condicionados tanto por el tipo de suelo como por el entorno ya que el suelo es arenoso y salino, por lo tanto puede inhibir el crecimiento de plantas y bacterias entre otras.

Para el tratamiento de fitorremediación se utilizarán plantas verdes que permitirán remover o reducir la toxicidad de los contaminantes presentes en el suelo. Se han identificado diversidad de especies vegetales que se emplean en dicho tratamiento.

Entre estas técnicas, se encuentra la **fitodegradación**, basada en el uso de plantas para transformar o degradar de sustancias menos tóxicas del tipo de contaminante orgánico como hidrocarburos de petróleo. Otra técnica aplicable puede ser la **fitoestimulación**, que se basa en que los exudados de las raíces de las plantas pueden promover el crecimiento de microorganismos que son capaces de degradar contaminantes orgánicos.

Un ejemplo claro es la *Vetiveria zizanioides*, que es conocida por su actividad como barrera para controlar la erosión. Esta especie tolera condiciones extremas en sus suelos y puede producir biomasa en grandes cantidades en las zonas contaminadas. Se usan en sitios donde el compuesto contaminante está a poca profundidad y es susceptible a ser degradado, por lo que la contaminación con hidrocarburos podría tratarse con este tipo de plantas.

Otros autores también recomiendan algunas otras especies de plantas probadas con éxito en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo de las cuales se nombran a continuación: *Zea mays* L., *Panicum maximum* Jacq., *Paspalum virgatum* L., *Echinochloa polystachya* H.B.K., *Sorghum vulgare* L., *Phaseolus vulgaris* L., *Phaseolus coccineus* L., *Chamaecrista nictitans* (L.) Moench., *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich) Stapf., *Triticum aestivum* L., *Hordeum vulgare* L., entre otras (Trujillo & Ramírez, 2012).

Se hace una estimación de costo de trabajo para tratar el suelo por esta tecnología, se estima que la técnica de fitorremediación de un suelo contaminado puede costar entre 50 - 100 USD/m³ (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez & Acevedo, 2011).

Otro tratamiento biológico aplicable puede ser **la biorremediación**, utilizando microorganismos como hongos o bacterias para degradar los hidrocarburos en sustancias menos tóxicas, teniendo como resultado un suelo limpio. La adición de nutrientes como nitrógeno y fósforo juega un papel importante en la biorremediación de los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, pues acelera el proceso de degradación.

Se hace una estimación de costo de trabajo del tratamiento para tratar el suelo, se estima que la técnica puede costar sobre 100 USD/m³ (Segovia, Papoulias & Kamp, 2016).

En cuanto a los tratamientos ex situ aplicables, se decide optar por los incluidos en dos grupos de tratamientos: tratamientos físicos – químicos y tratamientos biológicos.

Dentro del grupo de tratamientos físico-químico serían aplicables:

El lavado de suelo, para lo cual se retira el suelo contaminado de los pozos, se lleva a una zona determinada donde se procederá con el tratamiento y se realiza el lavado.

El lavado de suelo es una tecnología de corto a mediano plazo. La estimación de costo de la aplicación de esta tecnología fluctúa entre 70 – 187 USD/m³. En caso que el tratamiento de suelo sea completo y éste tenga un alto contenido de arcilla su costo será de entre 219 – 328 USD/m³ (Kaifer, Aguilar, Arana, Balseiro, Torá, Caleyá & Pijs, 2006).

La extracción química, la cual se ha llevado a cabo en el laboratorio de Petróleos de la UPSE para retirar y clasificar el crudo de las muestras. Se estima un costo dependiendo del tipo de suelo y el contaminante a tratar, estos factores permitirán determinar los disolventes a utilizar. El costo puede variar entre 130 - 270 USD/ton. (Kaifer, Aguilar, Arana, Balseiro, Torá, Caleyá & Pijs, 2006).

En el caso de optar por un tratamiento ex situ biológico, las opciones serían:

Landfarming, con un coste aproximado de la técnica de 33 - 66 USD/ m³ de suelo. Además requiere espacios grandes para su aplicación, la excavación del suelo puede liberar COVs, y se produce un incremento importante de volumen, por los materiales enmendantes añadidos (Kaifer, Aguilar, Arana, Balseiro, Torá, Caleyá & Pijs, 2006).

Compostaje. El costo del composteo depende de la cantidad y fracción de suelo a tratar, de la disponibilidad de agentes de volumen, del tipo de contaminantes (material con hoja secas recolectadas o material vegetal) y proceso, de la necesidad de tratamientos previos y/o posteriores; y necesidad de equipos para control de COVs. Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses. La estimación de costo se encuentra entre 130 - 260 USD/m³ (Ramón, 2019).

5. Selección de las tecnologías aplicados a los tres sectores

De acuerdo a la información recopilada durante el análisis e inspección de cada sector sobre las características para seleccionar la tecnología se va a seguir ciertos criterios mencionados anteriormente. Se propone las tecnologías aplicables a los sectores en mención:

SECTOR 1 – VALPARAÍSO

Tabla 15. Selección de la técnica de tratamiento in situ–ex situ para el sector1

TRATAMIENTO IN SITU – EX SITU			
MUESTRA DE SUELO	TIPO DE SUELO	ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS	COSTO UNITARIO (USD/m ³)
POZO VA 10	Franco arenoso	Lavado de suelo	70 – 187
		Extracción química	130 – 270 USD/ton
		Landfarming	33 - 66
		Compostaje	130 - 260
AFLORAMIENTO 1	Franco arenoso	Fitorremediación	50 - 100
		Biorremediación	100
POZO SPA 0079	Franco arenoso	Lavado de suelo	70 – 187
		Extracción química	130 - 270 USD/ton
		Landfarming	33 - 66
		Compostaje	130 - 260
POZO SPA 0081	Franco arenoso	Fitorremediación	50 - 100
		Biorremediación	100
POZO SPA 0085	Franco arenoso	Lavado de suelo	70 – 187
		Extracción química	130 - 270 USD/ton

		Landfarming	33 - 66
		Compostaje	130 - 260
POZO SPA CH1	Arenoso franco	Lavado de suelo	70 – 187
		Extracción química	130 - 270 USD/ton
		Landfarming	33 - 66
		Compostaje	130 - 260

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

SECTOR 2 – COSTA DE ORO

Tabla 16. Selección de la técnica de tratamiento in situ–ex situ para el sector2

TRATAMIENTO IN SITU – EX SITU			
MUESTRA DE SUELO	TIPO DE SUELO	ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS	COSTO UNITARIO
POZO SRA 056	Franco arcilloso	Lavado de suelo	70 – 187
		Extracción química	130 - 270 USD/ton
		Landfarming	33 - 66
		Compostaje	130 - 260

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

SECTOR 3 – SANTA ROSA

Tabla 17. Selección de la técnica de tratamiento in situ–ex situ para el sector3

TRATAMIENTO IN SITU – EX SITU			
MUESTRA DE SUELO	TIPO DE SUELO	ALTERNATIVAS TECNOLOGICAS	COSTO UNITARIO
POZO PETROPOLIS 0113		Lavado de suelo	70 – 187

	Franco arcillo arenoso	Extracción química	130 - 270 USD/ton
		Landfarming	33 - 66
		Compostaje	130 - 260

Elaborada por: Karen Yagual, 2020.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los tratamientos tanto ex situ como in situ son una buena opción para lograr degradar la contaminación de suelos por hidrocarburos, siendo el tratamiento in situ el más recomendado en suelos permeables y con contaminación superficial.

Los tratamientos ex situ son los que a rasgos generales mejor resultados muestran, debido a que se tiene un mejor control sobre las variables de operación. Por el contrario, generan un mayor costo debido al transporte del contaminante a la zona de tratamiento y a las instalaciones necesarias para éste.

En las zonas de áreas contaminadas pequeñas, y con un pozo que no esté en producción, se pueden llevar a cabo tratamientos in situ individuales de tipo biológico en cada una de ellas, ya que serán mucho más económicos que un tratamiento que conlleve el desarrollo de instalaciones ingenieriles.

En el caso de que los pozos estén en producción, la mejor alternativa sería retirar el suelo contaminado y realizar uno de los tratamientos ex situ recomendados para no entorpecer las labores de explotación del pozo.

En el caso de la aplicación de fitorremediación, preferiblemente se elegirán especies de plantas autóctonas para no afectar los ecosistemas existentes.

Los hidrocarburos deben tratarse como compuestos peligrosos, por lo que hay que tomar las debidas precauciones durante la manipulación de los instrumentos o compuestos que se utilizaran en las pruebas de laboratorio tanto para la determinación de la textura de suelo, como la extracción de crudo del mismo.

En base a la extensión de los suelos contaminados se recomienda realizar un estudio más extenso de suelos y contaminantes antes de llevar a cabo cualquier otro tipo de proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agreda J., (2019). Técnicas de remediación del suelo. Universidad Nacional de Loja.
- Ángeles C., (2010). Determinación de la textura de suelo. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Arroyo M., Esther y Quesada R. & Manuel J. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. Geocisa.
- Beall M., Razo M. & Serna J., (2011). Contaminación de suelo. Tratamiento térmico. Universidad autónoma de Chihuahua.
- Cando, M., (2011). Determinación y análisis de un proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Castillo P., (2009). Aplicación de la técnica de Landfarming para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Celorio, K., (2016). Remediación del derrame de crudo en el recinto Winchele desde una perspectiva ambiental y social. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Esmeraldas.
- Conde G. Excavación, retirada y tratamiento/eliminación ex situ de suelos contaminados. EOI Escuela de Negocios.
- Coria, I., (2007). Remediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos. Universidad Abierta Interamericana, Buenos Aires, Argentina.
- Chanapí A., Hernández L., Vega E. & Villate C., (2013). Contaminación del suelo. Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
- Del Carmen L., (1984). La recerca al sòl. Teide. Barcelona.
- Delgadillo A., González C., Prieto F., Villagómez J. & Acevedo O., (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. Tropical and Subtropical Agroecosystems.
- Escuredo A., Nogué J., Pous, P., Riera S. & Vallejo V.R., (1983) Iniciació a l'estudi del sòl. Edafologia. ICE, Universitat de Barcelona.

EPA. Técnicas de tratamiento innovadoras: Para suelos contaminados, fango residual, sedimentos y detritos. EPA 542-F-96-017. (1996). 1-2.

EPA. Guía para el ciudadano sobre Solidificación/Estabilización. EPA 542-F-01-024S. (2003).

Gavilán, A., Ize I. & Ortíz, O., (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. GACETA ECOLÓGICA. 1405-2849 (Diciembre 2003). 89-91.

Hereter A. & Josa R., (1988). Práctiques de sòls i adobs. 1. Práctiques de camp. Escola superior d'agricultura de Barcelona.

INECC, (2007). Tecnologías de remediación. Delegación Coyoacán, México.

Infantes C., Ortega C., Morales F., Ehrmann U., Hernández I. & Pérez R., (2010). Efecto del potasio en la biorremediación de un suelo contaminado con un crudo liviano. Bioagro v.22 n.2 Barquisimeto.

Instituto Tecnológico Geo Minero de España, (1996). Suelos contaminados. Madrid.

Iturbe R., Flores C., Chávez C. & Roldán A., (2001). Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas. Instituto de Ingeniería, UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México.

Kaifer J., Aguilar A., Arana E., Balseiro C., Torá I., Caleyá J., Pijs C., (2006). Guía de tecnologías de recuperación de suelos contaminados, Madrid.

Korda A., Santas P., Tenente A. y Santas R., (1997). Petroleum hydrocarbon bioremediation: Sampling and analytical techniques, in situ treatments and commercial microorganisms currently used. Appl. Microbiol. Biotechnol. 48: 677-686.

López A., (2006). Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.

Mattehews, Jhon E. et al. Handbook of Bioremediation. Oklahoma: Lewis publishers, (1993)

Nadal M. & Pujol J., (1978). El sòl. Quaderns de natura–I. Blume.

Ortiz, I., Sanz J., Dorado M., Villar, S., (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), España.

Ponce, D., (2014). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Universidad del Bio – Bio, Chile.

Ramírez, J. & Trujillo, M., (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2012 – ISSN 214 (Diciembre 2012).

Ramón J., (2019). Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados. Fundación Chile.

Riesco, R., (2012). Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Autónoma de Barcelona.

Roqueta D., (2016). Estudio bibliográfico de los criterios base para la selección del método de recuperación de un suelo contaminado. Universidad Politécnica de Valencia, Gandia.

Segovia R., Papoulias D. & Kamp R., (2016). Casos de estudio para costos de la remediación ambiental en zonas petroleras. E-Tech International.

Sienra M., Préndez M. & Romero R., (2002). Metodología para la extracción, fraccionamiento y cuantificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en material particulado urbano. Universidad de Chile. Bol. Soc. Chil. Quím. v.47, N°4.

Suárez, R., (2013). Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Libre Instituto de Postgrados Ingeniería, Bogotá D.C.

Torres, K. & Zuluaga T., (2009). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Vásquez J., Lemos J. & Del Castillo, (2017). Extracción de aceites por destilación soxhlet. Corporación Tecnológica de Bogotá, Tecnología en Química Industrial, Bogotá, Colombia.

ANEXOS

ANEXO 1. Identificación de las zonas potenciales con suelo contaminado.

ANEXO 1.1 Zona 1 sector Valparaíso.



Figura 44. Pozo VA 10 con suelo contaminado por petróleo.



Figura 45. Afloramiento 1 de petróleo.



Figura 46. Pozo SPA 0079 con suelo contaminado por petróleo.



Figura 47. Pozo SPA 0081 con suelo contaminado por petróleo.



Figura 48. Pozo SPA 0085 con suelo contaminado por petróleo.

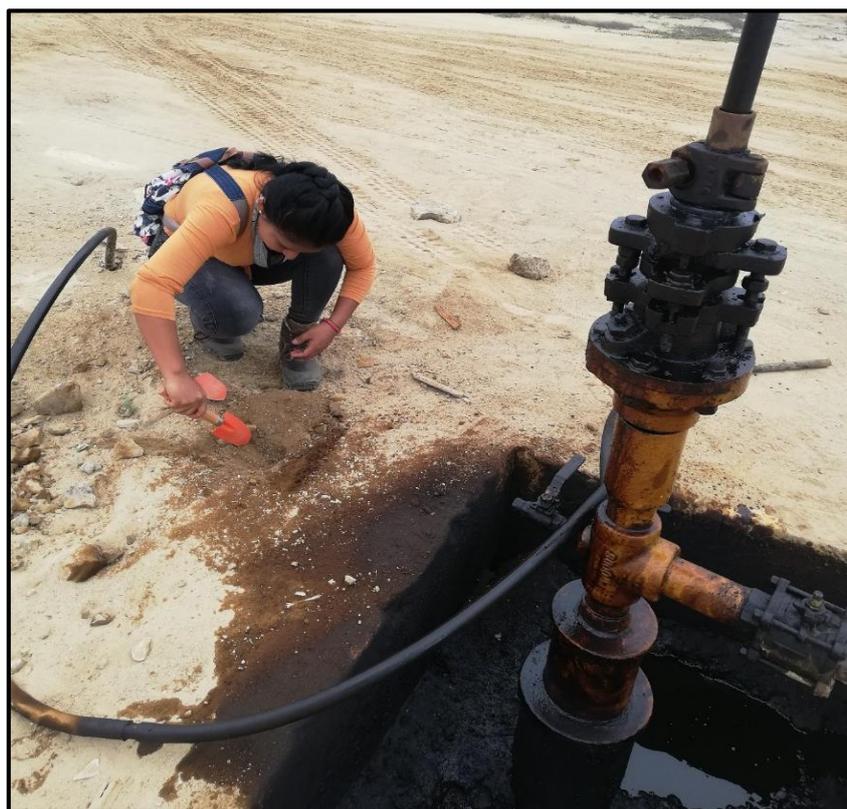


Figura 49. Pozo SPA CH 1 con suelo contaminado por petróleo.

ANEXO 1.2 Zona 2 sector Costa de Oro.



Figura 50. Pozo SRA 056 con suelo contaminado por petróleo.

ANEXO 1.3 Zona 3 sector Santa Rosa.



Figura 51. Pozo PETROPOLIS 0113 con suelo contaminado por petróleo.

ANEXO 2. Toma de la muestra de suelo en las zonas identificadas.



Figura 52. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo VA 10).



Figura 53. Toma de muestra del suelo contaminado (AFLORAMIENTO 1).



Figura 54. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA 0079).



Figura 55. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA 0081).



Figura 56. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA 0085).



Figura 57. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo SPA CH 1).



Figura 58. Toma de muestra del suelo contaminado (Pozo PETROPOLIS 0113).

ANEXO 3. Muestras y resultados de laboratorio de petróleo UPSE.



Figura 59. Muestras de suelo no contaminado para determinar la textura del mismo.



Figura 60. Muestras de suelo contraminado de los diferentes pozos de petróleo.



Figura 61. Muestras de suelo libre de petróleo resultado de la técnica de extracción con solvente.



Figura 62. Petróleo extraído de la técnica aplicada a las muestras de suelo contaminado.