

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



**USO DE SOLVENTES ORGÁNICOS EN LA EXTRACCIÓN DE DIÉSEL DE UN  
SUELO CONTAMINADO.**

**POR:**

**JOSEFA RODRÍGUEZ ZÚÑIGA**

**TESIS**

Presentada como Requisito Parcial para  
Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

**BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO**  
Noviembre de 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

Uso de Solventes Orgánicos en la Extracción de Diésel de un  
Suelo Contaminado.

Por:

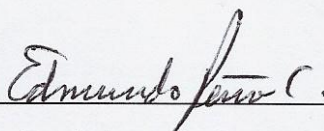
JOSEFA RODRÍGUEZ ZÚÑIGA

Tesis

Que se somete a consideración del H. jurado examinador como requisito parcial  
para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

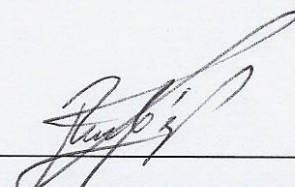
Aprobada por:



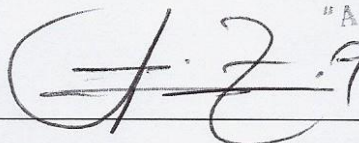
Dr. Edmundo Peña Cervantes  
Presidente



MC. Idalia MA. Hernández Torres  
Sinodal



Dr. Rubén López Cervantes  
Sinodal



MC. Luis Rodríguez Gutiérrez  
Coordinador de la División de Ingeniería



Coordinación de  
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre de 2014

## **DEDICATORIA**

A DIOS. Por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad. Por permitirme llegar a éste punto de mi vida, por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis padres. Isabel y Ariel. Por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos. María de Jesús, Azariel, Edgar y Carlos Alberto, Por el cariño incondicional y apoyo moral que siempre he recibido de ustedes.

## **AGRADECIMIENTO**

AL Dr. EDMUNDO PEÑA CERVANTES. Por la confianza, apoyo, dedicación de tiempo y por haber compartido conmigo sus conocimientos.

A LA MC. IDALIA MA. HERNÁNDEZ TORRES. Por su aportación y ayuda en la realización de este proyecto.

AL Dr. RUBÉN LÓPEZ CERVANTES. Por la aportación y sugerencias brindadas.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa o indirectamente a la realización de este proyecto.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CUADROS .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS.....	3
General .....	3
Específicos .....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Hidrocarburos .....	4
El Suelo.....	5
Contaminación de Suelos .....	7
Suelos Contaminados con Hidrocarburos.....	8
Mecanismos de Transporte del Contaminante en el Suelo.....	10
Diésel .....	10
Normatividad.....	13
Remediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos.....	13
Procesos de remediación. ....	14
Técnicas Disponibles para Eliminar Hidrocarburos .....	15
Tratamientos Biológicos.....	15
Fitorremediación:.....	16
Tratamiento Térmico.....	16
Desorción Térmica .....	16
Incineración .....	17
Vitrificación .....	17
Tratamiento Físico-Químico.....	17

Lavado de Suelos.....	18
Oxidación Química.....	18
Extracción de Vapores .....	18
Extracción con Solventes.....	18
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
Localización del Experimento.....	21
Metodología.....	21
Técnica Experimental .....	22
Extracción de Hidrocarburos .....	22
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>25</b>
Efecto del Diésel sobre Algunas Propiedades Físicas y Químicas del Suelo Utilizado.	25
Extracción de Diésel con Diferentes Solventes.....	30
Diésel Extraído Según el Tipo de Solvente.....	30
Extracción de Diésel con Combinaciones de Solventes.....	33
<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>35</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Pagina</b>
Cuadro. 1. Propiedades físicas y químicas del diésel.....	11
Cuadro. 2. Principales sustancias involucradas en las emergencias ambientales reportadas a PROFEPA durante el periodo (1996-2001).....	12
Cuadro. 3. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo. ....	13
Cuadro. 4. Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento.....	20
Cuadro. 5. Características físicas y químicas del suelo utilizado y contaminado...	22
Cuadro. 6. Tratamientos según la dosis empleada. ....	23
Cuadro. 7. Resultados de las propiedades Físicas y Químicas del suelo en estudio.....	25
Cuadro. 9. Extracción de diésel con diferentes solventes.....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pagina</b>
Figura 1. Variación de la textura en suelos contaminados con diferentes dosis de diésel. ....	26
Figura 2. Efecto del diésel sobre la conductividad eléctrica del suelo. ....	26
Figura 3. Variación del pH por concentración de diésel. ....	27
Figura 4. Variación de la materia orgánica. ....	28
Figura 5. Variación de carbonatos por concentración de diésel. ....	29
Figura 6. Eficiencia de extracción con diferentes solventes. ....	31
Figura 7. Eficiencia de extracción para cada combinación de solventes.....	34



## INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y la industrialización, son uno de los problemas más serios en materia de contaminación, ya que amenazan continuamente nuestro ambiente. El resultado de esto es la acumulación de contaminantes químicos en la biosfera, especialmente en suelos y sedimentos. En México, las principales actividades productivas, como la minería, la extracción y refinación del petróleo, la petroquímica y la industria química básica, han traído sin duda grandes beneficios económicos; sin embargo, al mismo tiempo han ocasionado graves problemas ambientales.

La generación de grandes cantidades de desechos y residuos peligrosos y la incidencia de fugas, derrames y accidentes químicos han incrementado el número de sitios contaminados y en nuestro país no existe un registro exacto de todos estos sitios; sin embargo, las estimaciones registran un número de varios miles, la mayoría de los cuales no han sido suficientemente caracterizados, para identificar el riesgo que representan para los ecosistemas y la población humana.

De acuerdo con datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000), la superficie de suelo degradado por causas atribuibles a la contaminación fue de 25 967 km<sup>2</sup> en 1999; sin embargo, en todo el país existen problemas de contaminación aún no cuantificados con precisión y pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación generados por el uso de agroquímicos, tanto fertilizantes (en especial los nitrogenados) como de pesticidas (fungicidas, herbicidas e insecticidas); los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (petróleo y derivados), así como los ligados a actividades mineras, en sus etapas de extracción como en las de procesamiento de los materiales obtenidos (INEGI-SEMARNAT, 1997).

La contaminación de suelos con diésel ha cobrado mucha importancia, de tal manera que se han implementado técnicas de descontaminación como son: vitrificación, incineración, desorción térmica, extracción de vapores, oxidación química, lavado de suelos, extracción con solventes y fitorremediación, entre otras. El monitoreo constante que se le debe dar a los suelos en recuperación en algunos casos son muy costosos, sobre todo por el equipo a emplear en laboratorio.

En este trabajo de investigación se trabajó con cuatros diferentes solventes para la extracción de un hidrocarburo de fracción media como el diésel, ya que es una técnica apropiada para implementarla y adaptarla, por su costo reducido y simplicidad frente a los análisis modernos con equipo sofisticado además de que puede dar buenos resultados para un monitoreo rápido y confiable.

Palabras Claves: solventes orgánicos, diésel.

# OBJETIVOS

## General

✚ Determinar la cantidad de diésel extraído, con el uso de solventes orgánicos, en un suelo contaminado.

## Específicos

✚ Determinar el efecto que produce el diésel, a diferentes concentraciones, sobre algunas propiedades físicas y químicas de un suelo contaminado.

✚ Establecer, la eficiencia de extracción del diésel de un suelo con diferentes solventes.

# REVISIÓN DE LITERATURA

## Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, y forman la base estructural común de todos los demás compuestos orgánicos. La mayoría se extrae de combustibles fósiles, en particular el petróleo, pero también del gas natural y de la hulla. Otras fuentes importantes incluyen la madera y los productos de fermentación de las plantas. El crudo es una mezcla compleja de sustancias formadas por restos de animales y vegetales que han estado sometidos a la acción bacteriana y a la catalítica de algunos compuestos inorgánicos durante millones de años. A consecuencia de esto, el petróleo contiene una gran cantidad de hidrocarburos saturados y los productos que se obtienen de él como lo son la gasolina, el aceite combustible, los aceites lubricantes y la parafina consisten principalmente en mezclas de estos hidrocarburos que varían de los líquidos más ligeros a los sólidos. (Chappin y Summerlin, 1988; PEMEX, 1988).

Se considera a los hidrocarburos de petróleo como una mezcla líquida compleja de gases, líquidos y sólidos, existiendo pequeñas cantidades de mezclas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de contener compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales (PEMEX, 1988).

La producción y el uso masivos de compuestos orgánicos los hace estar entre los contaminantes más frecuentes en suelos y aguas. Entre los cuales se encuentran los hidrocarburos monoaromáticos, hidrocarburos policíclicos aromáticos, hidrocarburos alifáticos, hidrocarburos policlorados, fenoles, nitroaromáticos, alcoholes, éteres, disolventes clorados, cianuros orgánicos, carbonilos de metales, etc. La distribución y el comportamiento de estos compuestos orgánicos contaminantes en suelos están gobernados por diferentes

factores que incluyen las características del suelo (pH, contenido en materia orgánica y arcilla, potencial redox, contenido en nutrientes, actividad microbiológica, etc.), las propiedades específicas de cada compuesto (presión de vapor, solubilidad, estabilidad química, biodegradabilidad, características de sorción, etc.) y factores ambientales como la temperatura y la precipitación. Así, estos compuestos pueden sufrir procesos de lavado, biodegradación, volatilización, fotodescomposición e hidrólisis, inmovilización por adsorción y formación de enlaces con partículas de arcilla, óxidos, oxihidróxidos, etc., y transferencia a organismos (Jones *et al.*, 1996).

Los hidrocarburos se pueden clasificar para su estudio de la siguiente manera:

Hidrocarburo de fracción ligera: mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre cinco y diez átomos de carbono (C5 a C10).

Hidrocarburos de fracción media: mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre diez y veintiocho átomos de carbono.

Hidrocarburos de fracción pesada: mezcla de hidrocarburos cuyo peso molecular sea mayor a C18. (NOM-138-SEMARNAT/SS-2003).

## **El Suelo**

El suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la Tierra, que se ha formado mediante una dinámica a partir de la corteza terrestre con la influencia de factores ambientales; proceso que ha tomado miles de años para tenerlo en su estado comúnmente conocido. Es un medio complejo y dinámico de constante evolución. Está formado por un 50 % de espacio libre (la mitad del espacio poroso ocupada por gases y la otra mitad por líquidos); un 40-50

% de sólidos minerales (meteorización de las rocas) y un 0.5-5% de materia orgánica (humus y derivados, biomasa viva y muerta) (Brock y Madigan, 2000). El suelo constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere la capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso antropogénico. Según las proporciones de arenas (0.05 - 2.0 mm de diámetro), limos (0.002 - 0.05 mm de diámetro), arcillas (inferior a 0.002 mm de diámetro) y materia orgánica, principalmente humus y derivados. (Casanova, M. 2006).

Los componentes minerales y la materia orgánica se distribuyen en el espacio generando una estructura porosa. Los poros pueden contener agua o aire, de manera que existen tres fases: sólida, líquida y gaseosa. El agua contenida en los poros del suelo contiene sales minerales y nutrimentos, este es el medio en el cual se puede desarrollar la actividad metabólica de los microorganismos que lo colonizan. (Casanova, M. 2006).

Es la base para la vida humana y animal; permite la implantación de las raíces de las plantas, y les proporciona agua y nutrimentos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas. (Eweis *et al.* 1998).

Desempeña también una importante función como hábitat biológico. Puede desarrollar gran cantidad de especies vegetales y animales que forman parte de la cadena alimenticia, y constituyen la riqueza de la biodiversidad.

De acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA, 2008), el suelo es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales.

Sin duda el suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes con el que contamos ya que proporciona los nutrientes, el agua y el soporte físico necesarios para el crecimiento vegetal y la producción de la biomasa en general, desempeñando así un papel fundamental como fuente de alimentación para los seres vivos; su importancia radica en que es un elemento natural dinámico y vivo que desempeñan diversas funciones, en las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuífero y de protección de los mismos; también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimenticia, además de ser el espacio en el cual se realizan actividades agrícolas y ganaderas (Saval, 1995).

### **Contaminación de Suelos**

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en unas concentraciones que superan el poder de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades. Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de edafización liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos (Macías, 1993).

De acuerdo a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, un contaminante es “toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural” (LGEEPA, 2008).

En todo el país existen problemas de contaminación de los cuales no se tiene un registro exacto. Sin embargo, pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación que se han estado generando por el uso de agroquímicos, tanto fertilizantes (en especial los nitrogenados) como de pesticidas (fungicidas, herbicidas e insecticidas); los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (petróleo y derivados), así como los ligados a actividades mineras, en sus etapas de extracción como en las de procesamiento de los materiales obtenidos (INEGI-SEMARNAP, 1997).

### **Suelos Contaminados con Hidrocarburos**

En México, al igual que en el resto del mundo, las principales actividades productivas, como la minería, la extracción y la refinación del petróleo, la petroquímica y la industria química básica, han traído sin duda grandes beneficios económicos; sin embargo, al mismo tiempo han ocasionado graves problemas ambientales (Volke y Velasco, 2002). Entre ellos, la generación de grandes cantidades de desechos y residuos peligrosos y la incidencia de fugas, derrames y accidentes químicos han incrementado el número de sitios contaminados. En nuestro país no existe un registro exacto de todos estos sitios; sin embargo, las estimaciones más conservadoras registran un número de varios miles, la mayoría de los cuales no han sido suficientemente caracterizados para identificar el riesgo que representan para los ecosistemas y la población humana (Cortinas de Nava, 2000).

Con respecto a los derrames y fugas de hidrocarburos, PEMEX reporta que durante el año 2001 hubo un total de 8,031 derrames de hidrocarburos (crudo, diésel y gasolina) derramados en su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país (PEMEX, 2001). Esta última cifra es importante, ya que de esta manera puede estimarse la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames. Uno de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por



actividades petroleras es Veracruz. De acuerdo con información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería "Lázaro Cárdenas" y el pantano de "Santa Alejandrina", ambos ubicados en el sureste de México.

Con respecto a los sitios industriales o de disposición de residuos registrados en 2009, se detectaron 11 sitios contaminados con hidrocarburos en Veracruz, 5 en Tamaulipas y 8 en Oaxaca (SEMARNAT, 2010). Por su parte, en referencia a las emergencias ambientales, (Sarmiento *et al.* 2003) reportan que en el periodo de 1993 a 2003 se presentó en México un promedio de 521 emergencias asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados se identificaron el petróleo, con el 42.1% y sus derivados con el 20.02 % (gasolinas, combustóleo, diésel); el gas licuado del petróleo, con el 3.19 %, el natural, con el 2.30 %, y otras sustancias que constituyeron el 27.71 %. Estas estadísticas muestran la magnitud de los impactos ocasionados por los hidrocarburos.

Durante las maniobras de extracción, procesamiento y transporte de los hidrocarburos, los suelos están continuamente sometidos a derrames accidentales. Cuando un suelo recibe un derrame cambia sus características, tanto químicas como biológicas. Desde el punto de vista químico, la principal modificación consiste en un incremento enorme del contenido de carbono (C). (INEGI, 2000).

Las propiedades químicas del suelo más afectadas por un derrame de hidrocarburos son:

- a. Aumento del carbono orgánico ya que el 75 % del carbono del petróleo crudo es oxidable

- b. Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos.
- c. Aumento del manganeso y hierro intercambiable
- d. Aumento del fósforo disponible (Semarnap. 1996).

### **Mecanismos de Transporte del Contaminante en el Suelo**

El desplazamiento de una sustancia contaminante a través del suelo, está directamente relacionada con las características del contaminante y del suelo. El movimiento de un hidrocarburo en el suelo se lleva a cabo de forma descendente en dirección vertical por la acción de la gravedad y un movimiento lateral producida por el efecto de las fuerzas capilares del suelo. Las características del suelo tales como la permeabilidad, tamaño de partículas, contenido de humedad y materia orgánica, estructura, profundidad del manto freático, temperatura y perspectiva pluvial, tiene una gran influencia en el comportamiento del contaminante, en esta caso en particular hidrocarburos (Ortinez-Brito *et al.*, 2003).

### **Diésel**

El diésel forma parte de la fracción mediana del crudo de petróleo, esto implica un rango de puntos de ebullición entre 200 y 350°C. Dentro del diésel se encuentran compuestos de entre 10 y 25 átomos de carbono, aunque los más abundantes son los que se tienen entre 15 y 17. En el caso de suelos contaminados por diésel, se encuentran compuestos más pesados que en los suelos contaminados por gasolina. Estos compuestos son: n-alcanos e isoprenoides (parafinas), cicloalcanos (naftenos) y aromáticos. Los más abundantes son los cicloalcanos, representando un 45% del total de hidrocarburos

del diésel. En general, los alcanos no se considera tóxicos, sin embargo, los compuestos de menor peso molecular pueden causar daños por inhalación o por su acción como disolventes.

Cuadro. 1. Propiedades físicas y químicas del diésel.

Propiedades	Diésel
Composición	C 10- C 19 HC
Carbono	86.5%
Azufre	0.05% máximo
Agua	161 ppm
Oxigeno	0%
Hidrogeno	13%
*Índice de cetano	40-55
Viscosidad cinemática 40°C	1.3-4.1 mm <sup>2</sup> /s
Punto de inflamación	60-80 °c
Punto de ebullición	188-343 °c
Gravedad específica	0.85 kg/L
Relación aire/combustible	15

\*mide la calidad de ignición de un diésel.  
Sarmiento, R. (2008).

El diésel es utilizado comúnmente para el transporte y la limpieza de máquinas. Este combustible es una mezcla compleja de n-alcanos, iso y cicloalcanos e hidrocarburos aromáticos. Particularmente los hidrocarburos aromáticos son de gran preocupación por su potencial carcinogénico y mutagénico.

Debido a la importante utilización del diésel, se generan pérdidas en suelos y aguas subterráneas durante su almacenamiento, derrames accidentales durante su transporte o incluso durante vertidos ilegales. Al poseer una alta hidrofobicidad,

baja volatilidad y solubilidad y alta absorción, resulta complicada su limpieza, especialmente en sistemas tan heterogéneos como el suelo (Atlas y Bartha, 1993). Esta información resulta alarmante y debería generar concientización y toma de medidas urgentes en cuanto a la generación y al tratamiento de estos residuos generados, para cuidado del medio ambiente y de la humanidad.

De acuerdo con la PROFEPA durante el periodo de 1996 al 2001 han ocurrido emergencias ambientales, en las cuales el diésel ocupa el tercer lugar de las principales sustancias involucradas en dichas emergencias.

Cuadro. 2. Principales sustancias involucradas en las emergencias ambientales reportadas a PROFEPA durante el periodo (1996-2001).

Sustancia	Emergencias (%)
Petróleo crudo	42.08
Gasolina	7.83
Diesel	6.8
Combustóleo	5.39
Amoniaco	4.05
Gas LP	3.19
Gas natural	2.3
Aceites	2.27
Ácido sulfúrico	2.27
Solventes orgánicos	1.1
Subtotal	77.28
Otras sustancias	22.72
<b>Total</b>	<b>100</b>

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA 2003).

## Normatividad

En México, la contaminación por hidrocarburos es un aspecto regulado por la Norma Oficial Mexicana NOM - 138- SEMARNAT /SS-2003, la cual determina los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.

Cuadro. 3. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo.

Fracción de hidrocarburos	Uso de suelo predominante (mg kg <sup>-1</sup> base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA. 2000) es el instrumento fundamental que introdujo la modificación en el régimen de las autorizaciones de obras o actividades "que pueden causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o de reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente". Se menciona particularmente, para las actividades petroleras.

### Remediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA. 2000), la restauración o remediación se define como el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

La necesidad de eliminar o reducir el contenido de hidrocarburos provenientes de la actividad humana ha llevado al desarrollo de diversas estrategias; la elección de estas estrategias depende del sistema afectado (derrame en ecosistemas acuáticos o terrestres), y las características físicas y químicas de los contaminantes, como así también de su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo.

En México, la PROFEPA ha manejado criterios de limpieza desarrollados por el Grupo de trabajo sobre restauración de suelos contaminados conformado por esta dependencia. Estos criterios se encuentran en la norma emergente NOM-EM-138-ECOL-2002. Esta en un tiempo fue emergente pero actualmente ya no lo es.

### **Procesos de remediación.**

1.- In situ. Se realiza en el mismo lugar donde se encuentra la contaminación, sin necesidad de excavar el suelo. Su principal ventaja es la disminución de costo en el procedimiento; sin embargo, requiere mayor tiempo de tratamiento, puede ser inseguro en cuanto a heterogeneidad en las características del suelo y presenta dificultad para verificar la eficiencia del proceso. (Volke y Velasco, 2002).

2.- Ex situ. La realización de este tipo de tratamientos requiere de excavación, o cualquier otro tipo de proceso para remover el suelo contaminado antes del tratamiento. Existen dos variantes una vez que el suelo ha sido extraído: que se aplique el tratamiento en el mismo sitio utilizando unidades móviles que son trasladadas al lugar (in situ), o bien transportar el suelo a las instalaciones donde se le aplicara el proceso de recuperación. Este tratamiento requiere menos tiempo de ejecución y es más seguro en cuanto a uniformidad ya que es posible

homogenizar y muestrear periódicamente; sin embargo, es necesario excavar el suelo, lo cual aumenta los costos por el equipo utilizado, además de que debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante. (Volke y Velasco, 2002).

## **Técnicas Disponibles para Eliminar Hidrocarburos**

Las técnicas de remediación de suelos implican cualquier operación que altera las características de los desechos peligrosos o contaminantes mediante la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos disminuyendo su toxicidad, volumen, o movilidad. (Volke y Velasco, 2002).

En los últimos años se ha puesto mayor atención en el desarrollo de técnicas que permitan la recuperación y reutilización de los suelos contaminados. Los siguientes tratamientos describen distintas técnicas de descontaminación de suelos, estos se basan en el principio de la tecnología de remediación y pueden ser tratamientos biológicos, físico-químicos o térmicos.

### **Tratamientos Biológicos.**

Se emplean reacciones metabólicas de organismos como plantas, hongos y bacterias para transformar o remover los contaminantes, esta consiste en el incremento de la disponibilidad de O<sub>2</sub> y añadir nutrimentos en el suelo. Este tipo de tecnologías son benéficas para el ambiente, no presentan costos elevados, los contaminantes generalmente son destruidos y se requiere de un mínimo o ningún tratamiento posterior, por otro lado presenta la desventaja de no poder usarse si el tipo de suelos no favorece el crecimiento de los organismos, además de requerir mayor tiempo de tratamiento.

## **Fitorremediación:**

Dentro de los tratamientos biológicos se puede nombrar la fitorremediación que consiste en la utilización de plantas para remover, transferir, estabilizar o destruir contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo. Este tipo de tratamiento incluye: la rizodegradación, fitoestabilización y fitoestabilización. (Volke y Velasco, 2002).

En determinadas ocasiones, los contaminantes degradados en moléculas más simples le van a servir a la planta para acelerar su crecimiento. Algunas de las enzimas presentes en la planta descomponen estos contaminantes en productos utilizables para el metabolismo de la planta. (Volke y Velasco, 2002).

## **Tratamiento Térmico.**

Utiliza calor para volatilizar, quemar, descomponer o fundir los contaminantes del suelo. Los vapores, cenizas y residuos líquidos generados requieren de tratamiento especial. Presentan la ventaja de ser los procesos más rápidos con una alta eficiencia para eliminar el contaminante, aunque también es el grupo de tratamiento más costoso. En esta clasificación se encuentran los siguientes grupos:

### **Desorción Térmica**

En este proceso el suelo contaminado se calienta de 90 °C a 540 °C para volatilizar agua y contaminantes orgánicos que son transportados hacia un sistema de tratamiento de gases. Es un proceso de separación física no destructivo (Castillo-Espinoza, 2008).



## **Incineración**

Este proceso puede realizarse tanto in situ como ex situ y se utilizan temperaturas que van desde los 870 °C y 1200 °C con el propósito de volatilizar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Generalmente se utilizan combustibles para iniciar el proceso y los incineradores bien operados alcanzan eficiencias de 99.99%; sin embargo los gases de combustión requieren de tratamiento (Volke y Velasco, 2002).

## **Vitrificación**

Es un proceso basado en el calentamiento eléctrico en el que el resultado es un material vítreo que impide la fuga de lixiviados. Utiliza temperaturas que van de 1,600 °C a 2,000 °C, permite la estabilización de la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los contaminantes orgánicos (Castillo-Espinoza, 2008).

## **Tratamiento Físico-Químico.**

Utiliza las propiedades físicas y/o químicas (porosidad, densidad, tamaño de partículas, viscosidad, etc.) de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Algunas de las ventajas de este tratamiento son: que pueden realizarse en periodos cortos, el equipo es accesible y no requiere de mucha energía. Sin embargo los residuos generados por técnicas de separación deben ser tratados, lo cual aumenta los costos y la necesidad de permisos; además los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes por lo que requieren sistemas de recuperación.

## **Lavado de Suelos**

Este proceso utiliza aditivos que incrementan la movilidad de los contaminantes y puede realizarse in situ o ex situ. Es empleado principalmente para el tratamiento de hidrocarburos, compuestos orgánicos y metales (Castillo-Espinoza, 2008).

## **Oxidación Química**

Emplea agentes oxidantes para llevar a cabo el tratamiento que consiste en la destrucción química completa con la producción de compuestos más estables e inertes. Los agentes más comunes son el ozono, el peróxido de hidrogeno y el permanganato de potasio. En algunos casos se emplean un catalizador que aumente el rendimiento de la oxidación (Castillo-Espinoza, 2008).

## **Extracción de Vapores**

Es una técnica en la que se aplica un vacío al suelo, para reducir un flujo controlado y continuo de aire y remover contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo usualmente se lleva a cabo in situ y su efectividad depende de la volatilidad de los contaminantes y de la permeabilidad y homogeneidad del suelo (Volke y Velasco, 2002).

## **Extracción con Solventes**

Este tratamiento consiste en utilizar solvente para separar o retirar los contaminantes inorgánicos peligrosos, no destruyéndolos sino concentrándolos para poder reciclarlos o eliminarlos con mayor facilidad.

Los principales solventes utilizados son:

- Dióxido de carbono líquido
- Butano
- Propano
- Acetona
- Metanol
- Éter dimetílico
- Hexano

Este tratamiento, aplicado *ex situ*, se basa en la extracción de los contaminantes mediante la mezcla en un tanque del suelo con un disolvente orgánico. El disolvente orgánico arrastra los contaminantes y se separa del suelo por evaporación, y mediante la adición de nuevos disolventes o destilación los contaminantes se eliminan para que el disolvente orgánico empleado pueda ser reutilizado. A su vez, el suelo tratado se lava para arrastrar cualquier resto que pueda quedar del disolvente.

Con esta técnica se obtienen muy buenos resultados para eliminar compuestos orgánicos como disolventes halogenados, hidrocarburos derivados del petróleo y compuestos organometálicos, aunque se debe tener en cuenta la posible toxicidad del disolvente empleado y los residuos de su posterior tratamiento para ser reutilizado.

Un ejemplo de ello lo muestran Truax *et al.* (1995) quienes estudiaron la remoción de hidrocarburos totales del petróleo (HTPs) de un suelo arenoso contaminado con diésel a escala de laboratorio, el tratamiento se llevó a cabo en un biorreactor continuo; alcanzando eficiencias de remoción hasta del 91%.

La Environment Protection Agency (EPA, 1996), recomienda la técnica de extracción con solventes para el tratamiento de suelos contaminados con

compuestos persistentes por ser eficiente, segura y económica y posee una guía para el tratamiento de suelos contaminados con sustancias peligrosas.

Cuadro. 4. Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento.

	Ventajas	Desventajas
Tratamiento Biológico	Son efectivos en cuanto a costos. Son tecnologías más benéficas para el ambiente. Los contaminantes generalmente son destruidos. Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior	Requieren mayores tiempos de tratamiento. Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. No pueden emplearse si el tipo de residuo no favorece el crecimiento microbiano
Tratamientos Físico Químicos	Son efectivos en cuanto a costos Pueden realizarse en periodos cortos El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería.	Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: Aumento en costos y necesidad de permisos. necesidad de sistemas de recuperación
Tratamientos Térmicos	Permite tiempos rápidos de limpieza	Es el grupo de tratamientos más costoso. Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo. Intensivos en mano de obra y capital.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Localización del Experimento**

El trabajo, se realizó en el Laboratorio de Química de Suelos del Departamento Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; en el municipio de Saltillo Coahuila, Se localiza entre las coordenadas geográficas 25° 22" de latitud norte y 101° 02" longitud oeste.

### **Metodología**

Se trabajó con un suelo representativo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. La muestra fue tomada a un lado de la carretera Saltillo – Zacatecas. Edificio del Instituto Mexicano del Maíz.

El suelo se dejó secar al medio ambiente, posteriormente se tamizo hasta llevarlo a un tamaño de partícula de 2 mm aproximadamente, con el fin de garantizar al momento de contaminarlo con el diésel una distribución homogénea del hidrocarburo y disminuir la formación de agregados.

Para la contaminación se tomaron cuatro muestras de suelo y se contaminaron con 20,000; 30,000; 40,000 y 50,000 mg kg<sup>-1</sup> de diésel, se colocaron en bolsas de plástico y se dejó incubar durante un mes, dándoles movimiento una vez por semana a cada una de las muestras con el objetivo de homogenizarlas.

Una vez transcurrido el tiempo, las muestras de suelo contaminadas fueron sometidas a los mismos análisis físicos y químicos que la muestra testigo; se analizaron todas las muestras, y los resultados obtenidos se compararon con el testigo correspondiente al mismo suelo sin contaminar y se procedió a la

extracción de dicho contaminante con diferentes solventes. En el cuadro 5 se muestran los métodos utilizados para el análisis del suelo.

Cuadro. 5. Características físicas y químicas del suelo utilizado y contaminado

Características evaluadas	Método
Materia orgánica (%)	Walkley-Black
Materia orgánica (%)	Calcinado
Textura % (arena/limo/arcilla)	hidrómetro de bouyoucos
pH	Potenciómetro
C.E. (dS/m)	punteo de Wheaston
Carbonatos totales (%)	reacción ácido – base

### **Técnica Experimental**

La técnica utilizada consiste en usar un solvente (un líquido capaz de disolver otra sustancia) para separar o retirar contaminantes orgánicos de una muestra previamente contaminada con diésel. En el presente trabajo se utilizaron cuatro solventes; acetona, éter, hexano y metanol; además se hicieron tres combinaciones con estos solventes acetona-éter, acetona-hexano y éter-hexano.

### **Extracción de Hidrocarburos**

Este método de laboratorio que tiene la finalidad de ir monitoreando el contenido y el grado de descontaminación de los suelos contaminados con hidrocarburos de fracción media a través del tiempo consiste en extraer los

hidrocarburos contenidos en el suelo, mediante la acción de un solvente orgánico volátil apropiado, que es agitado a través de la muestra varias veces durante un tiempo determinado y posteriormente separado por centrifugación. Mediante varias agitaciones con el solvente de extracción se logra la liberación del hidrocarburo contaminante y posteriormente mediante decantación se separan los líquidos del sólido contenido en el recipiente, los cuales se colocan en un vaso de precipitado previamente pesado y se lleva a la estufa para la evaporación del solvente utilizado, quedando únicamente el hidrocarburo.

Para la recuperación de hidrocarburos de suelo se empleó el método de extracción con solventes; para este estudio se utilizó un gramo de suelo contaminado y se agregó nueve ml de un solvente y se agito durante tres minutos y posteriormente se centrifugaron durante tres minutos a 3000 rpm; este proceso se repitió dos veces sobre el residuo sólido remanente hasta lograr un volumen de aproximadamente 13 ml de sobrenadante. Las muestras obtenidas se llevaron a la estufa a una temperatura entre 35-40° c, para la evaporación de los solventes, posteriormente se peso el vaso con el hidrocarburo y por diferencia se obtuvo la cantidad de hidrocarburo extraído, por los solventes de la muestra de suelo contaminado.

Cuadro. 6. Tratamientos según la dosis empleada.

Tratamientos	Diésel (mg kg <sup>-1</sup> )
T1	20,000
T2	30,000
T3	40,000
T4	50,000
Testigo	0

## **Diseño Experimental**

Los resultados obtenidos se analizaron con un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. El paquete experimental utilizado fue de la facultad de agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, versión 2.5. Esto se realizó únicamente para el estudio sobre la extracción del hidrocarburo con los diferentes solventes utilizados.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Efecto del Diésel sobre Algunas Propiedades Físicas y Químicas del Suelo Utilizado.

En esta sección se estudian las posibles modificaciones que pueden ocurrir a las propiedades físicas y químicas del suelo por efectos de la contaminación a diferentes concentraciones de diésel. (Cuadro 7)

Cuadro. 7. Resultados de las propiedades Físicas y Químicas del suelo en estudio.

	Arena	Limo	Arcilla	pH	CE	MO		Carbonatos
						Walkley-Black	Calcinado	
	-----%-----				dS m <sup>-1</sup>	-----%-----		%
testigo	34.8	32	33.2	7.2	2.6	5.15	10.82	64.05
T1	36.8	32	31.2	7.5	2.6	11.2	16.43	64.62
T2	34.8	30	35.2	7.5	2.6	20.5	13.97	62.12
T3	32.8	34	33.2	7.6	2.6	21.8	13.58	63.08
T4	32.8	32	35.2	7.6	2.6	19.8	15.33	61.64
diésel				7.4	0.05			

El suelo en estudio tiene una textura migajón arcilloso con reacción del suelo ligeramente alcalino encontrándose el pH de 7.2, una conductividad eléctrica de 2.6 dS m<sup>-1</sup>, con posible alta capacidad de retención de nutrientes dada su textura arcillosa, alto contenido en materia orgánica.

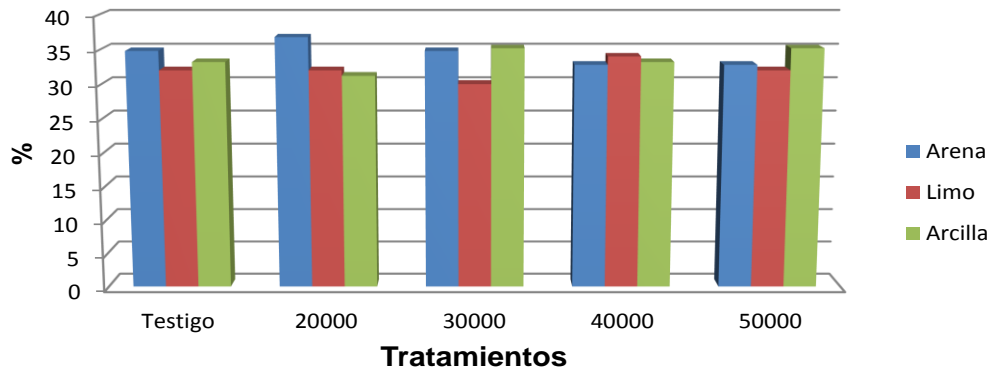


Figura 1. Variación de la textura en suelos contaminados con diferentes dosis de diésel.

En la figura 1 se presentan las variaciones de las partículas del suelo con respecto a la concentración de diesel estas son poco notables por lo cual no se presentan cambios importantes, permaneciendo así la misma clase textural (migajón-arcilloso).

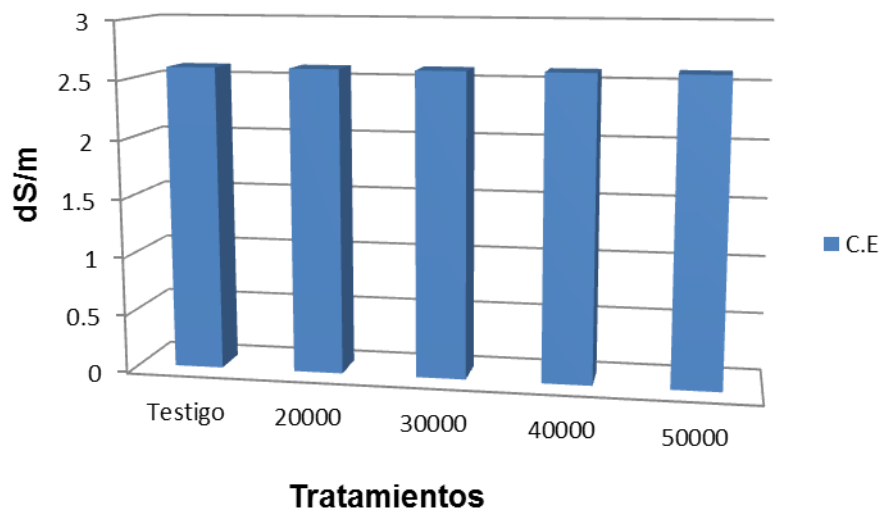


Figura 2. Efecto del diésel sobre la conductividad eléctrica del suelo.

Observando los resultados para todas las muestras de suelos contaminadas que se presentan en la figura 2 se observa que no se presentaron cambios importantes en la CE ya que no se obtuvo variaciones con respecto al testigo. Esto es normal si se toma en cuenta que la CE del diésel es extremadamente pequeña, prácticamente nula y esto no produce efectos de cambio sobre este parámetro, además el hidrocarburo no impide la solubilización de sales presentes en el suelo, lo cual se refleja en las cuantificaciones similares de conductividad en el extracto de la pasta de saturación del suelo con los diferentes tratamientos. Martínez *et al.*, (2001) observaron que no hay cambios significativos en la CE en suelo arcilloso sometido a contaminación con diésel a dosis de 100 a 150 000 mg kg<sup>-1</sup>.

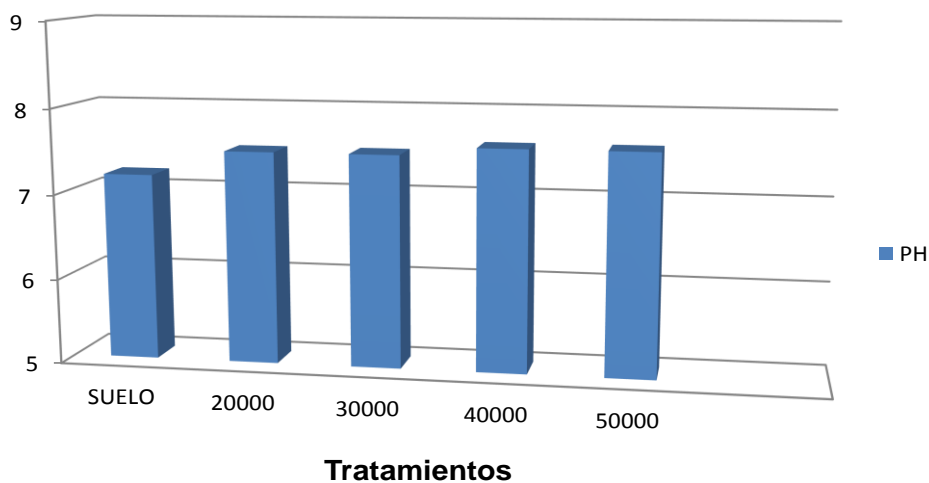


Figura 3. Variación del pH por concentración de diésel.

Como se puede apreciar en la figura 3, el pH del suelo fue en aumento de 7.2 que fue el testigo hasta 7.6 que fue el tratamiento con 50 000 mg kg<sup>-1</sup> de suelo.

De los resultados de pH se puede decir que presenta ligeras variaciones con respecto a cualquier concentración de diésel, sin embargo la reacción del suelo se mantiene en ligeramente alcalino. Martínez y López, (2001), investigaron el efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de un suelo arcilloso contaminado con diésel a bajas y altas dosis. Los resultados obtenidos entre el parámetro del pH y los factores de concentración determinaron que no hay diferencias significativas en esta variable para todas las muestras. El efecto del diésel en este caso tiene prácticamente el mismo comportamiento que la CE ya que el pH del diésel se encuentra muy cercano a la neutralidad.

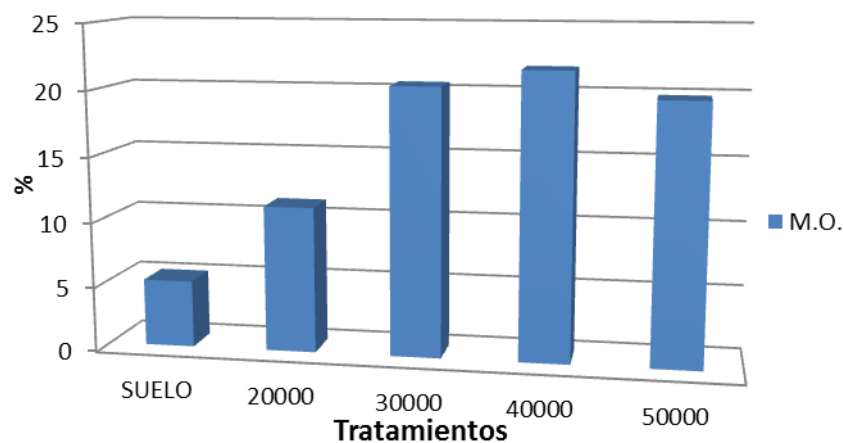


Figura 4. Variación de la materia orgánica.

En la figura 4 se observa, que la muestra de suelo testigo presenta poca cantidad de materia orgánica con respecto a los contaminados, por ello se deduce que los componentes del diésel al entrar en reacción exotérmica con el dicromato se oxidan en su mayor parte dando lugar a los valores altos de materia orgánica. Una de las propiedades químicas del suelo que son mayormente afectadas por un derrame de hidrocarburos es el aumento del carbono orgánico ya que el 75 % del carbono del petróleo crudo es oxidable. (Semarnap. 1996).

El diésel es el hidrocarburo que causa un mayor aumento en los niveles de materia orgánica, aumentando así a medida que aumenta la concentración de este en la muestra de suelo.

Los resultados obtenidos de esta variable coinciden con los de Martínez y López, (2001), ellos demostraron que la materia orgánica es uno de los parámetros con variaciones importantes en su estudio el cual aumenta en forma proporcional a la adición del hidrocarburo en el suelo. Resultando que el diésel mostro incrementos en dosis de 30,000 mg kg<sup>-1</sup> de diésel en suelo, obteniendo hasta 347% de incremento con respecto al suelo testigo. El valor de MO en este caso no es benéfico ya que este es material petrogenico y no biogenico. (Martínez y López, 2001).

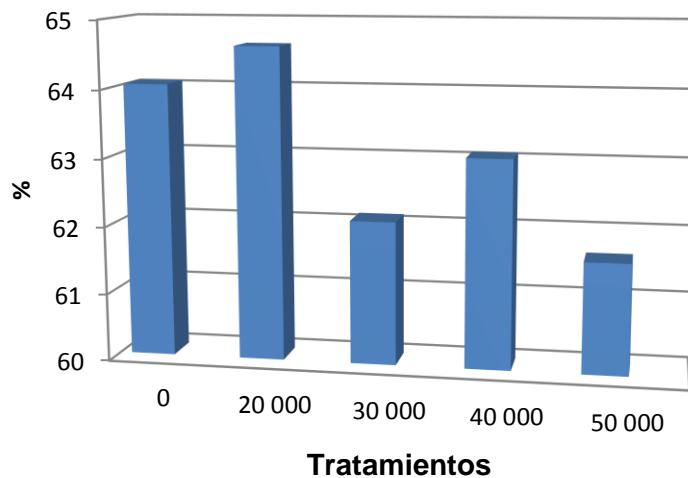


Figura 5. Variación de carbonatos por concentración de diésel.

Con respecto a la presencia de carbonatos, se observa en la figura 5 que el contenido de estos fue disminuyendo conforme aumentaba la dosis de diésel en el suelo. Esto indica una posible interferencia del diésel sobre los reactivos utilizados para la determinación de los carbonatos, lo que hace que se encuentren valores menores en el suelo con altas concentraciones del hidrocarburo, sin embargo

estas no son de gran importancia ya que aun en el suelo con la más alta concentración del diésel sigue siendo muy alto el contenido de carbonatos.

## Extracción de Diésel con Diferentes Solventes

### Diésel Extraído Según el Tipo de Solvente

En el cuadro 9 se presentan los resultados de la extracción de diésel en el suelo contaminado a varias concentraciones del hidrocarburo, con diferente tipo de solventes. En el podemos observar la comparación de medias que indica que en los casos del uso de acetona, hexano y éter existe diferencia significativa entre los tratamientos, sin embargo esta no es proporcional a la cantidad de diésel aplicado a los suelos.

Cuadro. 8. Extracción de diésel con diferentes solventes.

Suelos contaminados con diesel (mg kg <sup>-1</sup> )	Solventes			
	Acetona	Hexano	Éter	Metanol
20,000	19 000 D	14 800 D	15 800 D	9 200
30,000	26 900 C	22 700 C	24 900 C	14 300
40,000	34 400 B	31 700 B	30 700 B	20 100
50,000	42 300 A	38 700 A	37 400 A	26 200
C.V. (%)	10.51	5.90	4.58	

En los tratamientos con acetona se puede observar que con forme fue aumentando la dosis del diésel, la cantidad de extracción del diésel también aumenta sin embargo estos aumentos no son proporcionales, es así que se tienen 19 000; 26 900; 34 400; 42 300 mg kg<sup>-1</sup>.

Los resultados obtenidos en la extracción con hexano se observa que este fue en aumento conforme aumentaba la concentración de diésel, obteniendo 14

800; 22 700; 31 700 mg kg<sup>-1</sup>; en tratamientos con 20 000; 30 000; y 40 000 mg kg<sup>-1</sup> mientras que en el tratamiento con 50 000 mg kg<sup>-1</sup> se obtuvo un promedio de extracción de 38 700 mg kg<sup>-1</sup>

En las extracciones con éter los tratamientos con 20 000 y 30 000 mgkg<sup>-1</sup> este presenta cuantificaciones de 15 800 y 24 900 mg kg<sup>-1</sup> mayores con respecto a los obtenidos con hexano mientras que para los tratamientos con 40 000 y 50 000 mg kg<sup>-1</sup> se obtienen cuantificaciones menores a las obtenidas con hexano (30 700 y 37 400 mg kg<sup>-1</sup>). Los tres solventes presentan la misma tendencia de extracción pero dependiendo de la concentración del hidrocarburo son más o menos eficientes.

En los tratamientos con metanol no se tuvo respuestas significativas en comparación con los solventes anteriores presentando las menores cuantificaciones (9 200, 14 300, 20 100, 26 200 mg kg<sup>-1</sup>).

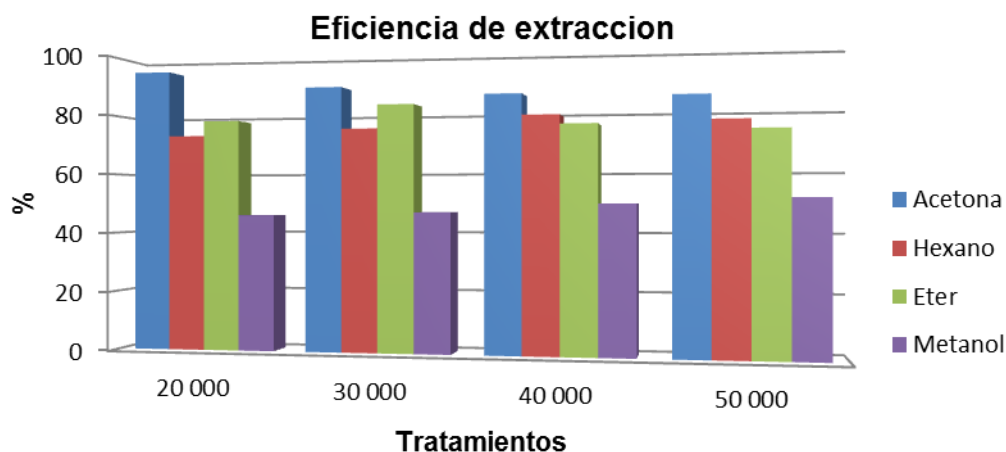


Figura 6. Eficiencia de extracción con diferentes solventes.

En la figura 6 se presenta la eficiencia de extracción de los solventes, de acuerdo a lo cuantificado en la extracción y relacionado a la dosis aplicada para la

contaminación, se puede observar que la acetona obtuvo las mayores cuantificaciones de hidrocarburo y por lo tanto un porcentaje máximo de extracción de 95% en el tratamiento que fue contaminado con 20 000 mg kg<sup>-1</sup> y un mínimo de extracción de 85% en el tratamiento de 50 000 mg kg<sup>-1</sup>.

El hexano a diferencia de la acetona con forme aumentaba la dosis de diésel en el suelo, la eficiencia de extracción fue en aumento de 73% en dosis de 20 000 mg kg<sup>-1</sup> a 79% en dosis de 40 000 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que en 50 000 mg kg<sup>-1</sup> disminuyo el porcentaje obteniendo así un 77% de eficiencia.

En el tratamiento con éter, en comparación con el hexano se obtuvo mayores resultados en suelo contaminado con 30 000 mg kg<sup>-1</sup> de diésel con 78 y 83% de eficiencia de extracción en los dos primeros tratamientos (20,000 y 30,000 mg kg<sup>-1</sup>), mientras que en los dos últimos (40 000 y 50 000 mg kg<sup>-1</sup>) el hexano tiene mayores resultados de 79 y 77 % de eficiencia con respecto al éter que presenta una eficiencia de 76 y 74%.

En los tratamientos con metanol no se tuvo respuesta importante en comparación con los solventes anteriores, presentando eficiencias máximas del 52% en tratamientos con 50,000 mg kg<sup>-1</sup> y una mínima de extracción del 46% en tratamientos con 20 000 mg kg<sup>-1</sup>.

De acuerdo a la NMX-AA-145-SCFI-2008 recomienda al cloruro de metileno o una mezcla de cloruro de metileno: acetona en relación 1:1. En este caso la acetona fue la que presento mayor extracción de diésel.



## Extracción de Diésel con Combinaciones de Solventes

Siguiendo las recomendaciones de la norma en cuanto a realizar combinaciones 1:1 se tomaron los solventes que tuvieron mayor eficiencia de extracción de dicho contaminante, quedando fuera el metanol ya que se obtuvieron resultados poco favorables presentando el 52% de eficiencia máxima en tratamientos con 50 000 mg kg<sup>-1</sup>.

En el cuadro 10 se muestran los resultados de la extracción de diésel a concentraciones de 20 000 a 50 000 mg kg<sup>-1</sup> con diferentes combinaciones y comparación de medias, la cual indica que existe diferencia significativa en las tres combinaciones.

Cuadro.10. Resultados de extracción de diésel con combinaciones de solventes.

Tratamientos mg kg <sup>-1</sup>	Solventes		
	Acetona: Hexano	Acetona: Éter	Hexano: Éter
20,000	14 500 D	13 800 C	16 100 D
30,000	20 600 C	15 000 BC	22 100 C
40,000	28 000 B	23 800 B	27 200 B
50,000	32 700 A	33 700 A	34 200 A
C.V. (%)	4.17	21.77	3.49

Comparando los resultados de extracción para todas las combinaciones se observa que el tratamiento que obtuvo mejores resultados es la combinación de hexano/éter para tratamientos con 20 000; 30 000 y 50 000 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que para el tratamiento con 40 000 mg kg<sup>-1</sup> se obtuvo mayor extracción con la combinación de acetona: hexano obteniendo 28 000 mg kg<sup>-1</sup>.

La norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 recomienda la combinación de acetona/hexano la cual en esta investigación no se obtuvo buenos resultados en comparación con la combinación de hexano/éter.

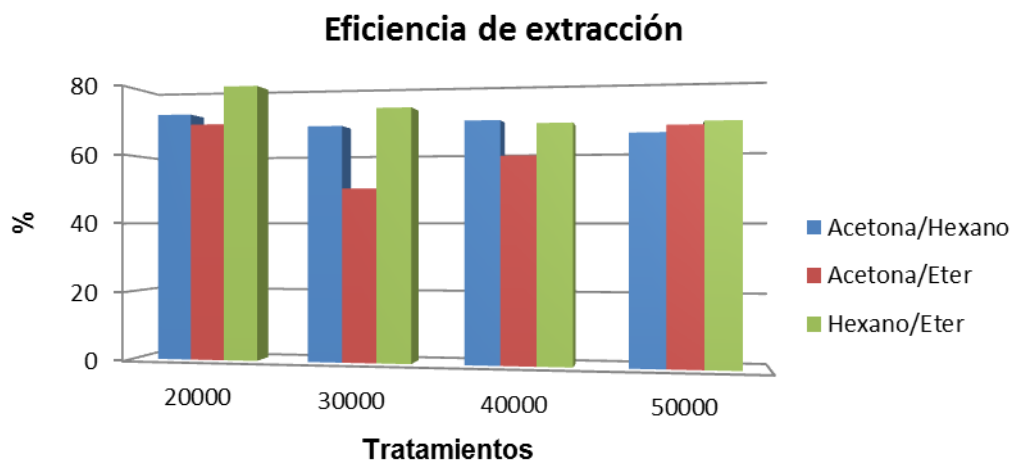


Figura 7. Eficiencia de extracción para cada combinación de solventes.

Los resultados muestran que la eficiencia de extracción para el primer tratamiento (20,000mg kg<sup>-1</sup>) es mejor con la combinación hexano/éter obteniendo un 80% de eficiencia lo que equivale a 16,100 mg kg<sup>-1</sup> de diésel en el suelo, de igual forma comparando los resultados de extracción para 30 000 y 50 000 mg kg<sup>-1</sup> se obtiene una eficiencia de extracción mayor en hexano/éter con resultados de 73 y 68%; para tratamientos de 40 000 mg kg<sup>-1</sup> de diésel en suelos se obtiene un mejor resultado en acetona/hexano con una mínima de diferencia con respecto al hexano/éter.

## CONCLUSIÓN

En las muestras de suelos contaminados, las características analizadas no se ven afectadas a excepción de la materia orgánica, la cual varía grandemente según la dosis de diésel, lo que es normal por los contenidos de carbono fácilmente oxidable del hidrocarburo.

Se puede concluir en este trabajo que en suelos contaminados con diésel en las dosis antes mencionadas, con acetona se obtienen los mejores resultados en la extracción de dicho contaminante.

Esta técnica de extracción aunque no esté apegada estrictamente a lo recomendado en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 da idea del grado de contaminación de un suelo por hidrocarburos de fracción media como el utilizado en esta investigación además tiene muchas ventajas en un laboratorio como la disminución del tiempo de extracción, bajo consumo y exposición a los solventes orgánicos, extracciones simultaneas de muestras y fácil operación. Lo cual sirve para un monitoreo continuo de los trabajos de remediación.

## LITERATURA CITADA

- Atlas, R. M., R. Bartha. 1993. Ecología Microbiana. Fundamentos y aplicaciones Tercera edición. Benjamin/Cummings.
- Brock, D., M. Madigan. 2000. Microbiología. Edición 8va. Aprendiz Salón Hispanoamericano. S.A. México.
- Casanova, M. 2006. Descripción y Propiedades de los Suelos. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Castillo-Espinoza, J.A. 2008. "Efecto de la Relación Suelo Surfactante en el Lavado de Suelos Contaminados por Hidrocarburos en un Tanque Agitado". UNAM México.
- Cortinas de Nava, 2000. Comunicación de Riesgos para el Manejo de Sustancias Peligrosas con Énfasis en Residuos Peligrosos. Instituto Nacional de Ecología, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Chappin, R. G., L.R. Summerlin. 1988. Química. Publicaciones Culturales, México.
- EPA. 1996 Method, 3540C. Soxhlet extraction. United States Environmental Protection Agency, SW-846 Manual. Washington, DC: Government Printing Office. 1-8 pp.
- INEGI-SEMARNAP. 1997. Estadísticas del Medio Ambiente. México.
- INEGI. 2000. Indicadores de Desarrollo Sustentable en México. INEGI, México. 213 pp.

Jones, K. C., R. E. Alcock., D. C. Johnson. 1996. Productos Químicos Orgánicos en Suelos Contaminados: Análisis, la Importancia y las Prioridades de Investigación. Contaminación del Suelo y Remediación, 3: 189-197.

LEGEPA. 2008. Prevención y control de la contaminación de suelos. México.

Macías, Felipe. 1993. Contaminación de suelos: algunos hechos y perspectivas. En: Ortiz Silla, R., (Ed.), Problemática Geoambiental y Desarrollo, Tomo I, pp. 53-74. V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Murcia

Martínez, M., E. Víctor. S. Felipe 2001. Efectos de Hidrocarburos Sobre las Características Físicas y Químicas de un Suelo Arcilloso. Terra 19: 9-17

Morales, H. M. 1995. Interpretación de Análisis Físicos y Químicos más Usuales en Muestras de Suelos. Saltillo, Coahuila, México. Monografía UAAAN.

NMX-AA-145-SCFI-2008 Suelos-Hidrocarburos Fracción Media por Cromatografía de Gases con Detector de Ionización de Flama. Diario Oficial de la Federación.

Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites máximos permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Diario Oficial de la Federación.

Oliveros Sáenz, Emilio. 1994. Paquete de diseños experimentales. Versión 2.5. Facultad de Agronomía UANL. Marín, N. L.

Ortíz-Brito, O., I. Lema-Irina., A. Gavilán-García. 2003. Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. pp. 83-92.

- PEMEX. 1988. El Petróleo. Gerencia de Información y Relaciones Públicas. México.
- PEMEX. 2001. Informe 2001: Seguridad, Salud y Medio Ambiente. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, PEMEX, México.
- PROFEPA. 2003. Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México.
- Sarmiento, M.R., E. Ortiz., J. Alvares. 2003. Emergencias Ambientales Asociadas a Sustancias Químicas en México.
- Sarmiento, R. 2008. Propiedades físicas y químicas del biodiesel vs diésel del petróleo. Energía a debate.
- Saval Bohórquez, S., 1995. "Remediación y Restauración", en PEMEX Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro, México, UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SEMARNAP 1996. Los suelos de tabasco Restauración, Conservación y Uso. Gobierno Constitucional del Estado de Tabasco, México.
- SEMARNAT. 2010. Contaminación y Remediación Anual de Sitios Afectados por Emergencias Ambientales. Base de Datos Estadísticos del Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales.
- Truax, D.D., R. Britto., H. Sherrard. Joseph. 1995. Bench-Scale Studies Of Reactor-Based Treatment Of Fuel-Contaminated Soil. Waste Management, Vol. 15, No. 5/6, pp. 351-357.

Volke, T., J. Velasco. 2002. Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados. Instituto Nacional de Ecología, México. 64pp.