



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO.**  
**DIVISION ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



**BUENAS PRÁCTICAS DE REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SITIOS  
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN SUELO  
AGRÍCOLA**

DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**PRESENTA:**

JAVIER ALBERTO SOLÍS GARCÍA

**BAJO LA DIRECCIÓN DE**

DR. RANDY HOWARD ADAMS SCHROEDER.

**EN COODIRECCION DE**

MIPA. LILIANA HERNÁNDEZ ACOSTA.

VILLAHERMOSA TABASCO, JUNIO 2024.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**2024**  
**Felipe Carrillo  
PUERTO**  
GOBIERNO DEL ESTADO DE TABASCO  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN Y CULTURA  
MEXICO

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 29 de Mayo de 2024

**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. JAVIER ALBERTO SOLÍS GARCÍA** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Desarrollo Tecnológico denominado: **"BUENAS PRÁCTICAS PARA LA REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN SUELO AGRÍCOLA"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

**A T E N T A M E N T E**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado





**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**2024**  
**Felipe Carrillo  
PUERTO**  
HEREDERO DEL MOVIMIENTO  
REVOLUCIONARIO Y DEFENSOR  
DEL PAIS  
CONSTITUCION DE  
MEXICO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

MAYO 29 DE 2024

**C. JAVIER ALBERTO SOLÍS GARCÍA  
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL  
PRESENTE**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Desarrollo Tecnológico denominado: **"BUENAS PRÁCTICAS PARA LA REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN SUELO AGRÍCOLA"**, asesorado por el Dr. Randy Howard Adams Schoroeder y M.I.P.A. Liliana Hernández Acosta, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el M. en C. Marco Antonio Hernández Cobián, M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dr. Randy Howard Adams Schoroeder, MIPA. Mayra Cecilia Villagómez de los Santos y M. en C. Miguel Bolaina Torres.

**ATENTAMENTE**  
**ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**



C.c.p.- Expediente del Alumno.  
Archivo.

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Desarrollo Tecnológico denominado: denominado: **“BUENAS PRÁCTICAS PARA LA REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN SUELO AGRÍCOLA”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionado, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación del Manual mencionado y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 29 del mes de Mayo de 2024.

**AUTORIZO**



**JAVIER ALBERTO SOLÍS GARCÍA**



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

31 de mayo de 2024

**C. Javier Alberto Solís García**  
**Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental**  
**PRESENTE**

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Desarrollo Tecnológico**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su documento de Desarrollo tecnológico "**Buenas prácticas de Remediación y Restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola**".

**OBSERVACIONES:**

Se incluyeron citas, se excluyeron bibliografía, fuentes pequeñas y se limitó el tamaño de coincidencias a 15 palabras.

<b>RESULTADO DE SIMILITUD</b>	<b>0 %</b>
	<b>17765 palabras, &lt;15 coincidencias, &lt;10% fuentes</b>

Finalmente, se le solicita al **C. Javier Alberto Solís García** integrar en la versión final del trabajo recepcional (Desarrollo Tecnológico), este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"**

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**



C.c.p. Dr. Randy Howard Adams Schroeder. Director del Desarrollo Tecnológico.  
C.c.p. MIPA. Liliana Hernández Acosta. Codirectora del Desarrollo Tecnológico  
C.c.p. Archivo

**KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA**  
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, e-mail: [direccion.dacbiol@ujat.mx](mailto:direccion.dacbiol@ujat.mx)

**Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda conservar los bosques**

# Buenas prácticas de Remediación y Restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola

---

INFORME DE ORIGINALIDAD

---

0%

ÍNDICE DE SIMILITUD

---

FUENTES PRIMARIAS

---

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

< 10%

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 15 PALABRAS

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,  
Mexico

## **Agradecimientos**

Primero agradezco a Dios por brindarme la capacidad de llegar a este punto de mi vida y creer en mí, de conocer, vivir y aprender tantas cosas.

Quiero continuar agradeciendo a mi papá el cual fue mi apoyo y sustento durante mi etapa estudiantil, sin su apoyo y ánimos no habría conseguido llegar tan lejos. A mi mamá que siempre estuvo ahí para escucharme y darme tantos consejos, por inspirarme a que si ella pudo, yo también. A mi hermana que siempre me hacia compañía y a mi novia que me alentó a continuar y dar lo mejor de mí. A mi amiga peluda de cuatro patas Kira que siempre me acompañaba en mis horas de investigación y redacción.

Agradezco de igual forma al Dr Randy, quien siempre respete y admire mucho por sus conocimientos y humildad. Gracias a sus clases tuve el valor de acércame con él y ser parte del laboratorio de remediación, por su orientación y apoyo durante este trabajo. Igualmente la Dra Verónica, quien respeto y aprecio mucho, siempre mostrando esa actitud protectora de apoyo hacia todos, sin ella tampoco habría concluido este trabajo. Y por supuesto, como dejar atrás a la maestra Liliana, que en todo momento fue de gran ayuda, orientación y apoyo para mí, no solamente en este trabajo si no, durante toda mi etapa en el laboratorio de remediación. Igualmente a todos los mientras de LAB-REM que forman un bonito y agradable ambiente, el mejor de toda la división. Gracias maestra, gracias Doctores me llevo muchos conocimientos por parte de ustedes.

Por ultimo agradezco a mis amigos que han estado conmigo durante toda la carrera y tuvimos crecimientos y aprendimos muchas cosas juntos. Alejandro que siempre fue un buen amigo y compañero en las materias y en el laboratorio, Majo que es de mis mejores amigas y siempre fue atenta y al resto de mis amigos y compañeros que recuerdo con afecto.

## Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. JUSTIFICACIÓN .....	11
2.1. Limitación de la normatividad basada en LMPs en la protección de la fertilidad del suelo. 11	
2.2. Diferencias en atención a zonas productoras de petróleo, entre México y Estados Unidos. 12	
2.3. Importancia de los objetivos de la remediación/restauración .....	14
3. ANTECEDENTES .....	15
3.1. Problemas en no cumplir el objetivo del aprovechamiento .....	16
4. MARCO TEÓRICO.....	19
4.1. Tipos de Problemas en la Fertilidad Causado por Hidrocarburos. ....	19
4.2. Los hidrocarburos y cómo influye en la remediación .....	23
5. OBJETIVOS.....	25
5.1. Objetivo general .....	25
6. METODOLOGÍA .....	26
6.1. Estrategias metodológicas .....	26
6.2. Contenido del Manual de Buenas Prácticas .....	26
6.3. Tríptico e infografía informativo sobre el manual .....	28
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
7.1. Manual de buenas prácticas de remediación y restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola .....	29
8. CONCLUSIONES.....	27
9. REFERENCIAS.....	28

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de sitios contaminados en México posee una gran diversidad en materia ambiental, debido a la variedad de sistemas ambientales que predominan en el país. Específicamente el estado de Tabasco que posee una gran diversidad de tipo de suelo, geoformas y ecosistemas que incluyen suelos arenosos costeros, marismas y pantanos, llanuras aluviales, así como áreas montañosas, utilizadas en diferentes actividades.

Respecto a las políticas públicas, existe una diferencia entre la tenencia de propiedades entre México y Estados Unidos, ya que cada una posee una legislación que, en el caso de los Estados Unidos, algunos lugares están más sujetos a sus leyes estatales que a las federales. En cuanto al aprovechamiento de los recursos naturales que se encuentren en el suelo, existen diferencias entre las leyes de México y Estados Unidos sobre su uso que pueden ser beneficiosas para los propietarios de predios en México o para los terratenientes en Estados Unidos. Ya que la extracción de un recurso como el petróleo tiende a tener más libertad en Estados Unidos que en México.

Es por esto que los campesinos no involucran una conexión positiva entre la explotación de petróleo crudo en pozos cercanos a sus predios, para ellos se refleja como una actividad que en cualquier momento puede involucrarlos en una problemática. Debido a esto, la relación entre las empresas y las comunidades se ve afectada por distintos ámbitos sociales y económicos.

En México, los suelos impactados por hidrocarburos son remediados mediante diversas técnicas, algunas reducen la concentración del contaminante y otras lo estabilizan; es por ello que las condiciones finales dependerán del proceso aplicado. Al no considerar esta situación, algunas áreas restauradas con vocación de uso agrícola-ganadera presentan problemas tales como baja producción de cultivos o forrajes (Morales-Bautista et al, 2019 pp. 1).

Durante la ejecución de un plan de remediación se contemplan diversos parámetros, pero, principalmente los que la legislación mexicana señala como requisitos para liberar un sitio, entre ellos están las concentraciones de hidrocarburos por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) según el uso del suelo, toxicidad y adversidades en la salud humana. Sin embargo, la fertilidad como parámetro a evaluar no se considera a pesar de que se alteren los

procesos biológicos del suelo y no siempre restablecen sus condiciones para que pueda ser aprovechado según su vocación natural, tal y como señala la LGEEPA (2022).

Los hidrocarburos de petróleo presentes en los sitios como fracciones residuales generan una problemática a pesar de que, de acuerdo a la normatividad, estos ya no representen un riesgo a la salud humana. “En concentraciones aún muy bajas (~2500mg TPH/kg) se observan afectaciones en el crecimiento de la vegetación e impactos en varios parámetros físico-químicos de fertilidad, particularmente sobre la capacidad de campo, temperatura, capacidad de intercambio catiónico, repelencia al agua, y porosidad” (Adams et al, 2008)

Mexico

de Tabasco,

## 2. JUSTIFICACIÓN

### 2.1. Limitación de la normatividad basada en LMPs en la protección de la fertilidad del suelo.

La Norma Oficial Mexicana: Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación (NOM-138-SEMARNA/SSA1-2012) tiene su origen en la Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002 que se publicó en el Diario Oficial de la Federación, la cual se presentó como una norma de emergencia (temporal) debido a la problemática sobre las concentraciones que deberían estipularse sobre los límites de hidrocarburos en el suelo, posteriormente actualizada como NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y hoy llamada frecuentemente simplemente como NOM-138, o Norma 138. Por su parte los métodos analíticos para la determinación de hidrocarburos en el suelo, tiene como referencia la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América, USEPA por sus siglas en inglés (SEMARNAT/SS, 2003).

Es a partir de esto último donde se evidencia que los métodos analíticos oficiales presentados en las NMX (Normas Mexicanas) están basados en las leyes de la USEPA los cuales han sido presentados para aquellas regiones en donde entró en vigor dicha ley, mas no en sitios en los cuales las características sociales, químicas, físicas, biológicas y climatologías son distintas. Esto no señala que se encuentren erróneas, más bien indican que han sido funcionales, ya que han servido como referencia. Sin embargo, no han sido desarrolladas para todo tipo de territorio, como algunos con las características que se presentan en México. Esto puede representar una complicación para aquellos sitios contaminados que se les haya aplicado un programa de remediación el cual se enfoque en mantener por debajo las concentraciones señaladas en la norma sin contemplar las adversidades que se puedan presentar después de la remediación, lo cual implicaría que las condiciones naturales del sitio estarían en riesgo según lo presentado en el programa de ordenamiento ecológico regional vigente de la región. Características delicadas como la fertilidad del suelo serían parte de dichas adversidades que se pueden llegar a identificar como una problemática.

## **2.2. Diferencias en atención a zonas productoras de petróleo, entre México y Estados Unidos.**

Características de México y Estados Unidos en la climatología, terrenos y zonas de producción.

En México el clima está determinado por diversos factores, entre los que se encuentran la altitud, la latitud y la distribución existente de tierra y agua, por mencionar algunos. En el territorio nacional se identificaron 7 grandes tipos de clima. Destacan con mayor extensión los climas: Cálido Subhúmedo, Seco y Semiseco, Muy Seco o Seco Desértico; con menor superficie los climas: Cálido Húmedo, Templado subhúmedo, Templado Húmedo y Frío con la mínima superficie (SEMARNAT, 2015).

Por otra parte, en Estados Unidos, las condiciones climatológicas pueden ser algo distintas. La inclinación, la rotación y la distribución tierra/mar de la Tierra afectan los patrones climáticos globales que observamos. Si bien el clima varía de un día a otro en un lugar en particular, a lo largo de los años volverá a ocurrir el mismo tipo de clima, las zonas climáticas en la región se clasifican en Climas Tropicales, Climas Secos, Climas Subtropicales Húmedos de Latitudes Medias, Climas Continentales Húmedos de Latitudes Medias y Tierras Altas (National Weather Service s.f.).

Para México la principal zona de producción petrolera son las aguas territoriales, seguidas por las regiones terrestres de los estados de Tabasco, Veracruz, Chiapas, Tamaulipas, Puebla, San Luis Potosí e Hidalgo (Sistema de Información Energética 2021). En cambio, para los Estados Unidos, aquellas zonas principales de producción petrolera son los estados de Texas, Nuevo México, Dakota del Norte, Colorado, Oklahoma, California, aguas territoriales etc... (U.S. Energy Information Administration, 2023).

Existe una diferencia en estas zonas de producción de esta materia prima llamada petróleo, en el país la principal zona de producción es el sureste, en donde abunda el clima cálido húmedo, esto por supuesto tiene una relación con el suelo, ya que dichas características climatológicas afectan a este en las diferentes estaciones del año por la abundancia de lluvias, humedad y sequías que se presentan. Esto conduce a que ocurrido algún incidente que cause adversidades en el suelo se pueda llegar a comportar de una forma distinta si se compara con

otras regiones donde el clima sea diferente ya que por lo tanto el suelo también lo será, como en el estado de Tabasco de los principales productores de petróleo. Por lo tanto, existe una diferencia de climatología entre las regiones productoras de petróleo de los Estados Unidos y México, por otra parte el estado de Texas el cual es de los principales productores terrestres de petróleo generalmente se divide en 10 regiones naturales o ecorregiones: los Bosques de Pino, las Marismas y Praderas del Golfo, la Sabana de Roble, las Praderas Blackland, los Cross Timbers, las Planicies del Sur de Texas, la Meseta Edwards, las Planicies Ondulantes, las Altas Planicies, y la Trans-Pecos (Texas Parks and Wildlife Department s.f).

Otra de las diferencias que se presentan entre México y Estados Unidos se puede encontrar el aprovechamiento, extracción y propiedad del petróleo, la tenencia de propiedades y sus bienes las cuales en ambas naciones se rigen de distintas formas por las leyes que permiten ciertas libertades a los terratenientes de los predios en Estados Unidos, a diferencia de aquellos propietarios de tierras sobre México que deben acatarse a otras normas y leyes.

El uso del suelo se basa en la vocación de este para su aprovechamiento, los bienes y recursos que este pueda ofrecer, si nos referimos hacia todos los propietarios del campo que exploten sus recursos ya sea de manera agrícola o de uso mineral, las leyes a las que estos están sujetos son distintas entre Estados Unidos y México.

Un claro ejemplo es la expropiación de un recurso como lo es el petróleo, por parte de del gobierno mexicano que, estipula en el artículo 27, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1997), “Tratándose del petróleo y de los hidrocarburos sólidos, líquidos o gaseosos, en el subsuelo, la propiedad de la Nación es inalienable e imprescriptible y no se otorgarán concesiones. Con el propósito de obtener ingresos para el Estado que contribuyan al desarrollo de largo plazo de la Nación, ésta llevará a cabo las actividades de exploración y extracción del petróleo y demás hidrocarburos mediante asignaciones a empresas productivas del Estado o a través de contratos con éstas o con particulares, en los términos de la Ley Reglamentaria”. Lo siguiente hace mención sobre que el uso de este recurso corresponde únicamente a la nación, esto sin remuneración alguna por parte del gobierno o alguna empresa privada que haya sido contratada, hacia el dueño del predio en el cual se haya encontrado dicho recurso.

Por otra parte, en Estados Unidos la situación cambia, ya que cualquier recurso que sea aprovechable en un predio el terrateniente puede explotarlo a su conveniencia ya sea de forma particular o recibir compensaciones por parte de una empresa que se encargue de la extracción. En *The Law of Capture (Ley de Captura)* se hace mención sobre el uso del suelo por parte del propietario. Un terrateniente puede capturar operaciones de petróleo y gas en su propia tierra, asumiendo que posee los derechos minerales de la tierra y el petróleo y el gas debajo de su tierra. Una vez que captura el petróleo y el gas, lo posee absolutamente, y queda reducido a su dominio y control (*The Law of Capture–Oil and Gas Law*, 2014).

Se debe de considerar las dimensiones de las áreas rurales en cada país ya que, mientras mayor sean estas, existen más posibilidades del uso de los recursos presentes en ellas por parte de los propietarios. En México, gran parte de las áreas rurales están destinadas al sector agrícola o ganadero, esto sucede de igual forma en Estados Unidos a diferencia de que la extensión territorial de dicho país es mayor. Según el censo de 2010, existen 3,143 condados en los Estados Unidos con una población total de 308.8 millones. 704 condados completamente rurales representaron 5.4 millones de personas. 1,185 condados en su mayoría rurales representaron 36.8 millones de personas. 1,254 condados en su mayoría urbanos representaron 266.6 millones de personas (United States Census, 2010). A diferencia del territorio mexicano que presenta sus propios datos en aquellas zonas rurales. En el país hay 9.3 millones de terrenos rurales que ocupan un área de 190.3 millones de hectáreas y representan el 96.9% de la superficie total del país. De ellos, 76.3 % son de propiedad social y 20.9% de propiedad privada. Cada gran productor tiene en promedio 94 hectáreas, mientras que los medianos y pequeños productores 13 hectáreas (INEGI 2017).

### **2.3. Importancia de los objetivos de la remediación/restauración**

La contaminación de sitios por hidrocarburos es cada vez más habitual en aquellas zonas de producción. Es por esto que la ley dicta que se deben tomar las medidas adecuadas tras el derrame de un contaminante en un suelo libre de este. Por lo tanto, en el capítulo IV de la LEGEEPA denominado como “Prevención y control de contaminación en el suelo”, en su artículo 134; fracción V, menciona sobre la presencia de materiales o residuos peligrosos en el suelo que generen un impacto negativo hacia este y por lo tanto emprender las acciones

necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable (LGEEPA, 2022). Es aquí donde se debe de tener presente que el suelo debe de funcionar bajo su aprovechamiento natural plasmado en un programa de desarrollo ecológico. Y así de esta forma, posteriormente después de una remediación o restauración continúe bajo su uso original.

Sin embargo, realmente cómo se puede saber si un contaminante puede presentar adversidades y cuáles son las condiciones que se tienen que presentar una vez el suelo se encuentre expuesto ante este. La LGEEPA (2022) hace mención a los siguientes puntos importantes en el artículo 136 que se deben de considerar para la evaluación del material o residuo que presente un riesgo según la ley:

- La contaminación del suelo,
- Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos,
- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación, y
- Riesgos y problemas de salud.

Los cuales se establecen como aspectos clave para la finalidad de una remediación: los problemas a la salud y las alteraciones en procesos biológicos, junto con el programa de ordenamiento ecológico para el aprovechamiento del suelo.

### **3. ANTECEDENTES**

La NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, que indica los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo, caracterización y especificaciones para la remediación, presenta las concentraciones (mg/kg de suelo base seca) máximas que se deben encontrar en sitios contaminado con hidrocarburos del petróleo en diferentes zonas, dependiendo de la fracción (ligera, mediana y pesada) y tipo de hidrocarburo, para que no represente un riesgo a la salud. Sin la finalidad de establecer concentraciones residuales (Límites Máximos Permisibles, LMP) que se presenten en zonas liberadas (remediadas) ya que mientras no sean un riesgo pueden ser declarados sitios remediados. Aun así, a pesar de

esta información, existe una contradicción respecto a lo citado en LGEEPA como “Restauración”: son actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de los procesos naturales.

Es aquí donde algunas situaciones en casos de estudios sugieren problemáticas (principalmente de fertilidad) ya que el tratamiento está orientado a cumplir con los Límites Máximos Permisibles de la norma, no obstante, no se ha mostrado que el cumplimiento de límites asegura el restablecimiento de sus condiciones de fertilidad.

Comúnmente, la misma técnica de remediación (orientada únicamente en reducir la concentración de hidrocarburos a los LMPs), resulta en una reducción en la cantidad de materia orgánica en el suelo. Con eso, se genera problemáticas de retención de humedad y fertilidad. Por otra parte, en los proyectos en donde se utiliza una tecnología *ex situ* (donde se extrae el suelo contaminado para tratarlo en una celda, reactor, horno, etc.), cuando se regresa el suelo tratado no se respeta el orden en que fue extraído del sitio. Esto frecuentemente resulta en la mezcla de subsuelo (de baja fertilidad) con el suelo superficial (más fértil, con mayor contenido de materia orgánica). Esto puede causar una reducción de fertilidad en el suelo superficial, en la zona de raíces, y resultar en el deterioro en la fertilidad del predio. Esto no permite restablecer sus condiciones para que pueda ser aprovechado según un estudio de ordenamiento territorial como exige la Ley (LGEEPA art. 134, fracc. V).

### **3.1. Problemas en no cumplir el objetivo del aprovechamiento**

Por otra parte, de no cumplir con la reparación de daños a bienes y perjuicios hacia los propietarios de aquellos sitios que hayan sido afectados, se estaría acreditando a sanciones contra delitos ambientales. El artículo 203 de la LGEEPA señala que toda aquella persona que contamine o deteriore el ambiente de tal forma que afecte los recursos naturales, será responsable de sus actos y estará obligado a reparar los impactos negativos hacia el ambiente que se hayan generado. Siguiendo con el artículo 204 de la misma ley, en el cual se enfocan que de haberse presentado daños o perjuicios a la parte afectada esta podrá solicitar a la Secretaría (SEMARNAT) un dictamen técnico el cual tendrá valor en caso de ser presentado en un juicio. Por consiguiente, estas leyes podrían ser respaldadas por el Código Civil en el artículo 1910 que refiere. El que obrando ilícitamente o contra las buenas costumbres cause

daño a otro, está obligado a repararlo, a menos que demuestre que el daño se produjo como consecuencia de culpa o negligencia inexcusable de la víctima (Código Civil 2021). Enfocado en materia ambiental, prosigue el artículo 1913 el cual señala una parte importante ya que específicamente menciona que, si por el uso de mecanismo, instrumentos, aparatos o sustancias peligrosas ocasionen adversidades al ambiente, la persona responsable está obligada a responder por el daño que cause. El artículo 1932 de igual forma señala que los propietarios responderán por los daños causados:

- I. Por la explosión de máquinas, o por la inflamación de sustancias explosivas;
- II. Por el humo o gases que sean nocivos a las personas o a las propiedades;
- III. Por la caída de sus árboles, cuando no sea ocasionada por fuerza mayor;
- IV. Por las emanaciones de cloacas o depósitos de materias infectantes;
- V. Por los depósitos de agua que humedezcan la pared del vecino o derramen sobre la propiedad de éste;
- VI. Por el peso o movimiento de las máquinas, por las aglomeraciones de materias o animales nocivos a la salud o por cualquiera causa que sin derecho origine algún daño.

Esto recuerda a todos aquellos incidentes por derrame de hidrocarburos de petróleo generados por la ruptura o fraccionamiento de ductos por falta de mantenimiento, manejo inadecuado o exposición a terceros. Debido a esto la industria del sector de extracción petróleo se expone a sanciones por el Código Penal Federal (2024); Delitos contra el ambiente y la gestión ambiental. En los artículos 414 y 415 se menciona sobre sanciones, actividades tecnológicas y peligrosas que por sus características representen un riesgo como el almacenamiento, producción, tráfico, importación, exportación, transporte, abandono, desecho o descargue que por exponerse al medio ambiente de manera ilícitamente o sin aplicar medidas de prevención o seguridad. Así como la emisión o descarga de gases contaminantes a la atmosfera o emisiones de ruido, vibraciones, energía térmica o lumínica que afecte al medio ambiente de manera directa o indirecta.

Los objetivos de la remediación/restauración se enfocan en aspectos toxicológicos con el propósito de evitar problemas a la salud y al ambiente, alteraciones en procesos biológicos, junto con el aprovechamiento del suelo mediante un programa de ordenamiento ecológico. En este último se ha presentado la inconformidad de los propietarios ya que cuando sus

predios son dañados o tratados generalmente no recuperan su capacidad de antes de que expusieran al contaminante (pastizales, cultivos).

Es por ello que surgen problemas por no cumplir con este objetivo del aprovechamiento; de primera instancia los pobladores optan por los bloqueos de caminos. Tal y como se presentó el 19 de enero de 1981, cuando una gran cantidad de campesinos interpuso lo que sería el mayor bloqueo de campos de producción petrolera hacia Petróleos Mexicanos (PEMEX) nunca antes visto. Entre las acciones de protesta que emprendieron estuvieron: obstaculizar el paso del Puente Limón en la zona fronteriza con Chiapas; la carretera de Reforma a la Estación Juárez hasta llegar a bloquear el Complejo Petroquímico de Cactus; el área industrial de Reforma; tomar 23 equipos de perforación, cuatro de reparación de pozos, nueve baterías, cinco estaciones de compresión y dos plantas de inyección de agua, al mismo tiempo que impidieron la entrada y salida de personal de la paraestatal (Pinkus-Rendón, Manuel Jesús, & Contreras-Sánchez, Alicia. 2012).

Esto puede generar una gran negatividad hacia las empresas privadas que bajo contratos trabajen con PEMEX puesto que el daño a su imagen por parte de la población aumenta gradualmente y esto crea barreras de comunicación y entendimiento con los ejidatarios, ganaderos, agricultores y demás población. Siendo el bloqueo de instalaciones o caminos el principal método de manifestación de la población, al cual recurren no solamente en instalaciones de procesamiento del crudo, sino en gasolineras o centros de almacenamientos y reparto de combustible. Tal y como se presentó un caso por el diario de noticiero local en Colima. El bloqueo de la instalación del almacenamiento y reparto de Pemex en el municipio de Colima donde se dieron los hechos en la colonia "Lo de Villa" generó pérdidas por cerca de 15 millones de pesos, por no haberse distribuido un millón de litros de gasolina y diésel en las despachadoras del estado (Velázquez Roque 2017).

Circunstancias como estas generan problemas de operatividad y horas perdidas de trabajo, continuando con pérdidas económicas, puesto que el salario a los obreros y trabajadores debe estar asegurado y situaciones adversas o ajenas a ellos no implica una reducción en sus horas de trabajo. La situación puede escalar a un mayor cuando se presenta la vía por demanda civil. Los campesinos afectados por la presencia de la actividad petrolera han generado demandas para la reparación de daños. Así lo expuso El Centro Mexicano de Derecho

Ambiental, A.C. (CEMDA) donde hace mención sobre un amparo ganado por campesinos y pescadores de Tabasco por contaminación ambiental de PEMEX. En el juicio interpuesto por campesinos y pescadores, con asesoría de la Asociación Ecológica Santo Tomás, A.C., CEMDA, Fronteras Comunes, A.C., y Litiga, Organización de Litigio Estratégico, A.C. (Litiga OLE), en 2013 se reclamó la omisión por parte de las autoridades de respetar y proteger los derechos humanos de las quejas a la salud, la vida digna y el medio ambiente, por parte de Pemex (CEMDA 2017). Todas estas situaciones pueden generar mayores pérdidas pues se debe resarcir los daños generados económicamente en la producción o funcionamiento del predio según su uso, sumado a esto los daños y perjuicios que se presenten hacia el propietario y por supuesto si el sitio ha sido contaminado, se debe llevar a cabo una caracterización que defina que tecnología de remediación es aplicable en el caso.

Lo anterior se identifica como situaciones que pueden llegar a suceder en caso de que se pase por alto las necesidades de la población cercana a aquellos sitios donde se tiene presencia de las empresas de remediación o extracción de petróleo. Sin embargo, no tiene que ser de esa forma. Se sugiere llevar a cabo actividades que involucre a las personas para hacerlas sentir participe de los proyectos y evitar la propagación de la idea de que son invasores que llegaron a perjudicar sus predios o pueblo. Cumplir con el propósito de asegurar la fertilidad de los sitios les proporciona mayor confianza y seguridad a las personas, mejora la imagen de las empresas y evita que surjan disputas o descontentos que ocasionen problemáticas como las ya mencionadas.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. Tipos de Problemas en la Fertilidad Causado por Hidrocarburos.**

La problemática de la fertilidad en los suelos por contaminantes como hidrocarburos de petróleo se presenta de la siguiente forma:

**Formación de láminas de hidrocarburos en los agregados del suelo:** Al entrar en contacto un contaminante como los hidrocarburos en suelo, actúan de distintas formas dependiendo del tipo de fracción del crudo y el tipo de suelo que se expone. La textura del suelo lleva a cabo un papel importante en estos casos puesto que el porcentaje de arcillas, limos, arenas o

materia orgánica es un factor considerable a evaluar en un suelo que puede ser más vulnerable que otro en la formación de láminas de hidrocarburo residual. Aquellos suelos donde predominen las arenas, presentan menos retención de humedad, sobre todo después de un periodo de sequía. Es por esto que son vulnerables después de haber sido contaminados por hidrocarburo, ya que la fracción residual forma una lámina meteorizada sobre las partículas del suelo, así lo reporto Adams (2008) como cito en Roy y McGill (2000). Esta lámina de hidrocarburos interfiere con la interacción normal entre el agua y las superficies del suelo. En particular, dificulta que se moja el suelo (repelencia al agua), y aunque se humedece, se mantiene menos humedad. Durante periodos de sequía, se secan más temprano en la temporada y se secan más, muchas veces hasta perder su cobertura vegetal.

**Aglomeración de partículas del suelo:** Las partículas tienden a variar dependiendo del tipo de suelo en el que se encuentren, una de las características son el espacio poroso que existe entre ellas, aquellos suelos arenosos poseen mayor cantidad de macro poros en donde existe una mejor aireación y menor retención de humedad. Por su parte en los suelos arcillosos tienden a tener una mayor cantidad de microporos, por lo tanto, su aireación es menor y presentan mayor retención de humedad. Cuando los hidrocarburos son degradados en el suelo se presenta una fracción residual que llega a intemperizarse con el tiempo, esta presenta una consistencia viscosa que posee una gran densidad. Al entrar en contacto con las partículas del suelo se genera una formación aglomerante entre ellas, los hidrocarburos, en su mayoría el de fracción pesada, tiene un efecto de pegamento que ocasiona que las partículas más pequeñas se agrupen entre sí, formando aglomeraciones de mayor tamaño, generando grumos que por su alta densidad y viscosidad se adhieren unas con otras. Adams et al, (2008) reporto el efecto entre como un crudo de fracción pesada actúa como aglomerante. “Pegando las partículas finas en el suelo (arcillas) en partículas más gruesas (tamaño de arena)” (Adams et al, 2008).

Esto provoca alteraciones en la aireación del suelo ya que el espacio poroso cambia, problemas de capacidad de campo y retención de humedad puesto que el agua tiende a infiltrarse más rápido o escurrir, adversidades sobre la fertilidad del suelo ya que se produce un efecto de compactación que genera problemáticas en las raíces de las plantas lo cual les

impide prevalecer, de igual se acelera el efecto de la erosión ya que las partículas del suelo han perdido estabilidad.

A niveles microscópicos el efecto que sucede básicamente en el recubrimiento de las partículas por el hidrocarburo residual, lo que genera el efecto de adhesión entre ellas provocando su aglomeración y dificultades en el intercambio catiónico.

**Obstrucción de poros:** Los espacios porosos del suelo albergan aire y agua, lo cual tiene como consecuencia la aireación del suelo y la retención de humedad, esto genera las condiciones para el desarrollo de la actividad biológica, que es fundamental en la fertilidad y salud del suelo, si se interfiere en los espacios porosos del suelo puede llegar a ocasionar alteraciones en sus características físicas y químicas. Debido a la estructura química de los hidrocarburos de petróleo, cuando son vertidos en el suelo existe una fracción que se volatiliza, mientras que otra es aprovechada por la actividad microbiana. Sin embargo, una fracción prevalece en el suelo obstruyendo el espacio poroso. Esto produce un efecto de compresión en el suelo que interfiere en sus procesos naturales y reduciendo su permeabilidad. Adams et al, (2008) reporta la existencia de una relación entre la reducción del espacio poroso debido al incremento de concentración de un crudo de fracción pesada. Esto es especialmente problemático en suelos de arcillas marrón o grisáceas, pero no tanto en suelos de arcillas rojizas o amarillas.

**Influencia de las arcillas en el tipo de suelo:** Existen suelos ricos en arcillas que contienen buen porcentaje de esmectitas y otros en los que abundan otro tipo de minerales como las caolinitas, vermiculitas, illitas, amorfos y limos. “Las arcillas son un conjunto de minerales de origen secundario, formado en el proceso de alteración química de las rocas, poseen un tamaño coloidal, con estructura cristalina bien definida y un gran desarrollo superficial” (Jordán López 2006).

Las esmectitas son filosilicatos, un grupo de minerales de la arcilla que está compuesto por la pirofilita, beidelita y montmorillonita que tienen origen en suelos poco alcalinos o neutros con elevadas concentraciones de silicio o magnesio, algunas de sus cualidades son que poseen una gran capacidad de intercambio catiónico. Pueden cambiar con mayor facilidad los iones en su superficie exterior, en los espacios interlaminares, o en otros espacios

interiores de las estructuras. También presentan una elevada capacidad de absorción de agua u otras moléculas en el espacio interlaminar. Esto da lugar a otro suceso conocido como hidratación o hinchamiento el cual ocurre por la absorción del agua en el espacio interlaminar que genera la separación de las partículas láminas generando un efecto de hinchazón. “Cuando se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente las láminas” (Jordán López 2006).

Por otra parte, los suelos que contienen otros finos como las caolinitas e illitas, que son arcillas no expansivas y las vermiculitas que, aunque no son frecuentes tienden a expandirse y permite la entrada de agua y otras partículas, de igual forma otros minerales como limos y amorfos se encuentran presente en el suelo y tienen una gran relevancia en su interacción con los hidrocarburos de petróleo.

Los suelos que contienen pocos finos o no los contienen al entrar en contacto con hidrocarburos totales de petróleo (HTP), debido a las características de este interactúan de una forma que pueden llegar a generar repelencia al agua o reducir su capacidad de campo puesto que la adhesión de los HTP en estas partículas que por su tamaño pueden generar un taponeo de poros o un recubrimiento de los finos por parte del contaminante, alterando así su ciclo durante las estaciones de sequía que pueden ser más intensas en el suelo ocasionando que se marchite el pasto. De igual forma aquellos suelos que son finos, pero con pocos (o nulos) esmectitas tienden a sufrir compactación si están contaminados con hidrocarburos pesados o intemperizados se pueden llegar a generar estructuras alifáticas que generan también problemas de retención de humedad y alteran la temperatura del suelo causando estrés hídrico en las raíces de las plantas.

Los suelos ricos en esmectitas al ser contaminados por hidrocarburos de petróleo también pueden presentar adversidades, debido a sus propiedades cuando las láminas de arcillas se hinchan por la presencia de agua y se encuentran alteradas por la presencia del contaminante estas pueden generar problemas de anegamiento por el taponeo de poros, lo cual ocasiona una baja o poca infiltración zonas pantanosas son las más vulnerables ya que pueden ocasionar pérdida de vegetación por el exceso de humedad que genere pudrición en las raíces

y condiciones anoxias. Otra característica de los suelos ricos en esmectitas es que estos interactúan diferentemente en sí, estos podrían llegar a presentar repelencia a diferencia de otros suelos con otro tipo de finos. Se tienden aglomerar a sí mismo, dejando expuesto superficies de partículas más gruesas que posiblemente sean repelentes, este efecto genera cierta confusión en la textura del suelo puesto que da la impresión de que se producen más partículas de arena que de arcilla o limos, sin embargo, es el conglomerado de estas que al sufrir un efecto adhesivo por el hidrocarburo cambia sus apariencias físicas creando problemas de capacidad de campo y repelencia al agua.

**Cantidad de materia orgánica (MO):** La materia orgánica es un factor que se debe considerar al momento de llevar a cabo una caracterización puesto que esta podría ser un indicador de fertilidad, actividad biológica y retención de humedad. La MO posee una buena capacidad de intercambio catiónico lo cual genera una mayor interacción entre los demás componentes del suelo como el agua y los minerales. La presencia de un suelo fértil se podría considerar como un parámetro de abundante MO ya que favorece la retención de nutrientes que provoca la proliferación y actividad biológica, (Morales Bautista, 2014). Define el aprovechamiento de las sustancias húmicas que pueden alterar la degradación de compuestos orgánicos a través de adsorción, degradación por hidrólisis y fotodescomposición. Los suelos que tienen mucha materia orgánica, amortiguan todos los efectos negativos, ocasionados por la presencia de hidrocarburos de petróleo y son más resilientes, menos susceptibles a deteriorar su fertilidad cuando se contamine.

Se debe de hacer mención de igual forma en el papel que juega la MO en la remediación de sitios, mediante el uso de esta como enmienda orgánica genera un proceso de biorremediación ya que sirve como bioestimulante para los organismos, genera un efecto amortiguador en situaciones en las que el pH se eleva, mejora la retención de humedad y es capaz de regresar la fertilidad al suelo.

#### **4.2. Los hidrocarburos y cómo influye en la remediación**

Los hidrocarburos de petróleo se pueden clasificar de diferentes maneras. La industria petrolera clasifica el petróleo y sus refinados según su densidad específica, que es relacionada por una fórmula a sus Grados API, también conocido como Gravedad API. Hay una tendencia

que los de menor densidad (mayor Grados API, °API) tienen mayor cantidad de hidrocarburos aprovechables después de la refinación, en especial gasolinas y destilados medios (diésel, gasóleo). Para este fin, la industria ha definido el petróleo en Súper Ligero, Ligero, Mediano, Pesado y Extrapesado.

Estas definiciones no tienen una relación con la clasificación de fracciones de hidrocarburos utilizados por parte de las dependencias ambientales (p.ej. USEPA, SEMARNAT/ASEA), que son definidos según el número de carbonos en la fracción de hidrocarburos. Cabe mencionar también, que no todos los hidrocarburos en la misma fracción (ambiental) tienen las mismas propiedades. Algunos son alcanos lineales, otros alcanos ramificados o cíclicos, también aromáticos de un solo anillo, de dos anillos y de varios anillos (los Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares – HAPs), además de algunos naftenos (de doble enlace entre carbonos), y los nombrados resinas y polares, (que incluyen átomos de oxígeno, azufre y nitrógeno, además de hidrógeno y carbono). Finalmente, se defina de manera operativa a los asfaltenos, como la fracción no soluble en pentano o hexano. Estos hidrocarburos tienden a tener pesos moleculares muy altos, muchos grupos fenílicos alquilados y son poco reactivos en términos de toxicidad. Los asfaltenos no son cuantificados por los métodos de norma actual en México y no son considerados tóxicos (pero sí pueden causar problemas en la fertilidad del suelo). En muchos casos, aunque son hidrocarburos en la misma clasificación ambiental, pueden tener propiedades muy diferentes en términos de toxicidad, potencial cancerígeno, dispersión en el ambiente, capacidad de ser biodegradado, y su impacto en las propiedades de fertilidad del suelo.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. Objetivo general**

- Diseñar un manual de buenas prácticas para la remediación y restauración de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo y con uso agrícola o pecuaria, dirigido a empresas y dependencias a fines a esta actividad.

### **5.2. Objetivos específicos.**

- Presentar la legislación ambiental en el marco de la omisión de la fertilidad para la liberación de un sitio contaminado.
- Nombrar las diferentes consecuencias en la relación empresa-comunidad, asociadas a las problemáticas sociales y de la fertilidad en el suelo.
- Recomendar como concluir los proyectos de remediación de manera efectiva y económica contemplando la fertilidad.
- Concentrar la información en un manual, y material para su divulgación.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Estrategias metodológicas

Se llevaron a cabo el uso de distintas estrategias para la divulgación y entendimiento del tema a tratar, con la finalidad de su accesibilidad como información y practicidad.



### 6.2. Contenido del Manual de Buenas Prácticas

Se realizó un Manual de “Buenas prácticas de remediación y restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola” el cual abarca el contenido introductorio, justificación y presentación del tema principal de manera cronológica, divulgación de las estrategias para propiciar el aprovechamiento del suelo. Consta de

imágenes, esquemas y cuadros para su mayor practicidad y accesibilidad a la información la cual es concreta y accesible para un mayor entendimiento.

### **Adversidades a la fertilidad del suelo**

Se expone como la ley no prevé la fertilidad (aprovechamiento) del suelo como un parámetro para liberar un sitio a pesar de que este cumpla con los límites máximos permisibles. De igual forma se hará mención de cuál es el aspecto positivo de contemplar la fertilidad, exponiendo, así como poder concluir una remediación de manera económicamente factible.

### **Problemas por hidrocarburos de petróleo (HC)**

Este apartado trata los tipos de problemáticas de fertilidad en el suelo que interfieren con el aprovechamiento que ocurren después de que haya ocurrido un derrame que altere la integridad natural del suelo. Se mencionan adversidades como la formación de láminas de hidrocarburo en el suelo, taponeo de poros, aglomeración de partículas y de igual forma como las propiedades del suelo interactúan con el contaminante, la cantidad de materia orgánica, el contacto con las arcillas y la importancia de regresar a sus condiciones originales el suelo.

### **Cómo influye el tipo de HCs**

Se presenta de igual forma como los hidrocarburos afectan al suelo debido a sus cambios químicos una vez que estos se encuentran liberados en el medio ambiente. Haciendo mención de las características de cómo influyen las fracciones ligeras (C5-10), fracciones medianas-1 (C11-16), fracciones medianas-2 (C17-34).

### **Relación comunidad–empresa (o dependencia)**

En el contenido del manual se creó un apartado sobre los puntos en contra y a favor de incentivar el favor social de la población cercana al área de operación y cómo esta puede ocasionar pérdidas económicas, de horarios laborales y retrasos en las fechas previstas de la actividad industrial. Se presentan problemáticas de daño a la imagen de la empresa, bloqueos y demandas por la vía civil. Continuando con la parte complementaria de los aspectos positivos de contemplar estos puntos a nivel social fueron; la aceptación de la comunidad, colaboración de esta con las obras que la empresa esté llevando a cabo, crecimiento en la credibilidad de la empresa, evitar pérdidas económicas, incremento en mano de obra,

cooperación de desarrollos sociales entre la comunidad y la empresa, comunicación entre la comunidad y la empresa ante problemáticas imprevistas ocurridas.

### **Tecnologías de remediación y restauración recomendadas que propicien la fertilidad para su aprovechamiento**

Se mencionaron las estrategias sugeridas de tecnologías recomendadas a las problemáticas que se presenten para propiciar la fertilidad del suelo al concluir la remediación contemplando su practicidad y evaluación económica.

- Importancia de remediar suelo superficial y subsuelo aparte
- Como la repelencia al agua puede ser tratado con desorción alcalina complementada con enmienda orgánica y fitorremediación
- Problemáticas como compactación pueden ser tratados mediante arado profundo, aplicación de enmienda orgánica y fitorremediación.
- Problemas con baja capacidad de campo se pueden resolver mediante el uso de enmienda orgánica, arado y fitorremediación.
- Situaciones de anegamiento se contrarrestan con la alteración al drenaje o estabilización químico-biológica.

### **6.3. Tríptico e infografía informativo sobre el manual**

En actividad se generó un tríptico que tiene como finalidad ser accesible y de fácil entendimiento en el cual se exponen de forma concreta, ilustrativa, didáctica y esquemática los puntos que se desarrollaron en el manual, así de esta forma se puede incentivar la consulta y revisión del contenido del manual.

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **7.1. Manual de buenas prácticas de remediación y restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola**

Como resultado principal de este proyecto se generó un manual en el cual se expone una problemática hacia el aprovechamiento del suelo por parte de la legislación ambiental y en como este afecta las comunidades y a las empresas o dependencias encargadas de realizar programas de remediación. Y se propusieron estrategias obtenidas mediante la recaudación de información y revisión bibliográfica que respalden la efectividad de estas prácticas, para contrarrestar los problemas que se generen por hidrocarburos de petróleo en el suelo que alteren los procesos naturales en el aprovechamiento.

Este manual busca tener una función como material de referencia, apoyo, informativo o de respaldo para las empresas dedicadas a la liberación de sitios contaminados (aunque igualmente funciona como material divulgativo según los intereses) para que estas contemplen el aprovechamiento del suelo como un parámetro a considerar. Mediante el uso de estrategias para contrarrestar problemas de aprovechamiento del suelo, ya que se pueden presentar diversas alteraciones en las características de este y que afecten la vocación de uso del suelo según lo estipulado en el programa de ordenamiento ecológico vigente, ocasionando inconformidad y descontento social en las comunidades cercanas a las zonas de producción de petróleo generando conflicto con las empresas.



**BUENAS PRÁCTICAS DE REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN  
DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO  
EN SUELO AGRÍCOLA**



MAYO 2024



INFORMACIÓN DISPONIBLE ABIERTA A TODO PÚBLICO.

**Título:** Buenas prácticas de remediación de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola.

**Autores:** Javier Alberto Solis García, Dr. Randy Howard Adams Schroeder, MIPA. Liliana Hernández Acosta, Dra Verónica Isidra Domínguez Rodríguez.

**En cooperación con:**

División Académica De Ciencias Biológicas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Laboratorio de Remediación (Lab-Rem), UJAT - DACBIOL.

**Contacto:**

- 99-33-58-15-00
- Extensión 6467
- drrandocan@hotmail.com
- academiadeextencionismo.ujat@gmail.com

Este documento se encuentra dirigido hacia el público interesado en el tema. El uso de esta información tiene como objetivo ser una herramienta para el estudio y evaluación sitios de uso agrícola (principalmente) que hayan sido contaminados con hidrocarburos de petróleo y también para aquellos que se les se les aplicó un programa de remediación y que aun presenten adversidades en su aprovechamiento (siendo estos de uso agrícola, forestal, pecuario y de conservación).

# ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>II. LA NORMATIVIDAD BASADA EN LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES.....</b>	<b>6</b>
2.1. ¿Existen limitaciones en los límites máximos permisibles para el aprovechamiento del suelo?.....	6
2.2. ¿La NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 se enfoca en la toxicidad?.....	6
2.3. ¿La normatividad contempla el aprovechamiento?.....	6
<b>III. Alteraciones en las características del suelo.....</b>	<b>7</b>
3.1. Tipos de problemas al aprovechamiento del suelo por alteraciones debido a la presencia de hidrocarburos de petróleo.....	7
3.1.1. Formación de láminas de hidrocarburos en los agregados del suelo.....	7
3.1.2. Aglomeración de partículas del suelo.....	8
3.1.3. Taponeo de poros.....	8
3.2. Influencia del tipo de arcillas en el suelo y la cantidad de materia orgánica.....	9
3.2.1. Arcillas (esmectitas.).....	9
3.2.2. Afectaciones en los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo que poseen mayor cantidad de esmectitas.....	10
3.2.3. Afectaciones en suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo que presentan menor cantidad de esmectitas o no tienen.....	10
3.2.4. Principales impactos en suelos por la presencia de hidrocarburos.....	11
3.2.5. Materia Orgánica (MO).....	12
<b>IV. Características de los hidrocarburos de petróleo y cómo influyen en la remediación...12</b>	
4.1. Características de los hidrocarburos.....	12
4.2. Tipos de fracciones (y número de carbonos).....	15
<b>V. Consecuencias sociales a favor y en contra de cumplir con el aprovechamiento del suelo.....</b>	<b>18</b>
5.1. Sanciones y derechos ambientales.....	18
5.2. Beneficios de atender el descontento social de la comunidad para el aprovechamiento del suelo.....	19
<b>VI. Estrategias para tratar problemas de aprovechamiento en el suelo.....</b>	<b>20</b>

6.1. Importancia de remediar suelo superficial y subsuelo aparte.....	20
6.2. La repelencia al agua tratada con desorción alcalina complementada con enmienda orgánica y fitorremediación.....	24
6.3. Problemáticas como la compactación y baja capacidad de campo pueden ser tratados mediante arado profundo, aplicación de enmienda orgánica y fitorremediación.....	28
6.4. Situaciones de anegamiento se contrarrestan con la alteración al drenaje o estabilización químico-biológica.....	31
6.5. Recomendaciones.....	31
<b>VII. Observaciones generales.....</b>	<b>34</b>
<b>VIII. Referencias.....</b>	<b>35</b>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,  
Mexico

## **I. Introducción**

Mediante la Universidad Juárez autónoma de Tabasco (UJAT), en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) en el Laboratorio de Remediación (LAB-REM) se recaudó información bibliográfica sobre casos de estudios en sitios contaminados por hidrocarburos de petróleo que presentaron adversidades a su aprovechamiento, alterando su fertilidad en suelos de uso agrícola principalmente.

Este documento cumple con el objetivo de ser material de referencia para aquellos sitios que hayan sido contaminados o se les haya aplicado un programa de remediación y persistan o surjan alteraciones en las características del suelo que afecten su aprovechamiento. Mediante el uso de ciertas estrategias, se presentan algunas tecnologías de remediación y restauración que se pueden aplicar. De igual forma se menciona sobre como la normatividad actual se enfoca en los límites máximos permisibles para liberar un sitio ya que estos como objetivo principal tienen reducir la toxicidad hasta un nivel seguro para la salud humana, sin embargo, esto no considera el restablecimiento de las condiciones del sitio para su aprovechamiento en caso de que estas se vean alteradas. Así mismo también se trata una parte importante en la relación de las empresas con la comunidad y como el descontento de la población puede generar negatividades; en este documento se habla sobre los beneficios de atender a la comunidad para el aprovechamiento del suelo.

## II. La normatividad basada en los límites máximos permisibles.

### 2.1. ¿Existen limitaciones en los límites máximos permisibles para el aprovechamiento del suelo?

Actualmente para liberar un sitio contaminado con hidrocarburos de petróleo las empresas deben cumplir con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 la cual presenta los límites máximos permisibles de hidrocarburos en los diferentes tipos de suelo, todo esto con la finalidad de que no representen un riesgo para la salud.

### 2.2. ¿La NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 se enfoca en la toxicidad?

La finalidad de la NOM-138 es cumplir con el objetivo de la remediación el cual se encuentra definido en la legislación ambiental en el artículo 5 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos; la trata principalmente los puntos de eliminar o reducir el contaminante hasta un nivel seguro para la salud y en prevenir la dispersión al ambiente de un contaminante. Ambos puntos se cumplen con mantener las concentraciones mínimas de hidrocarburos presentadas en la NOM-138.

### 2.3. ¿La normatividad contempla el aprovechamiento?

La finalidad del aprovechamiento del suelo corresponde a su uso según su vocación natural o lo establecido en el programa de ordenamiento ecológico vigente, siendo estos de uso agrícola, forestal, pecuario y de conservación. La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en el artículo 134 menciona que en suelos contaminados se deben realizar las actividades necesarias para recuperar o restablecer sus



Producción de chile en predio que había sido contaminado y continuó siendo aprovechado. Teapa, Tabasco (2023).

condiciones de tal forma que pueda ser aprovechado según el programa de ordenamiento ecológico aplicable.

### III. Alteraciones en las características del suelo

3.1. Tipos de problemas al aprovechamiento del suelo por alteraciones debido a la presencia de hidrocarburos de petróleo.

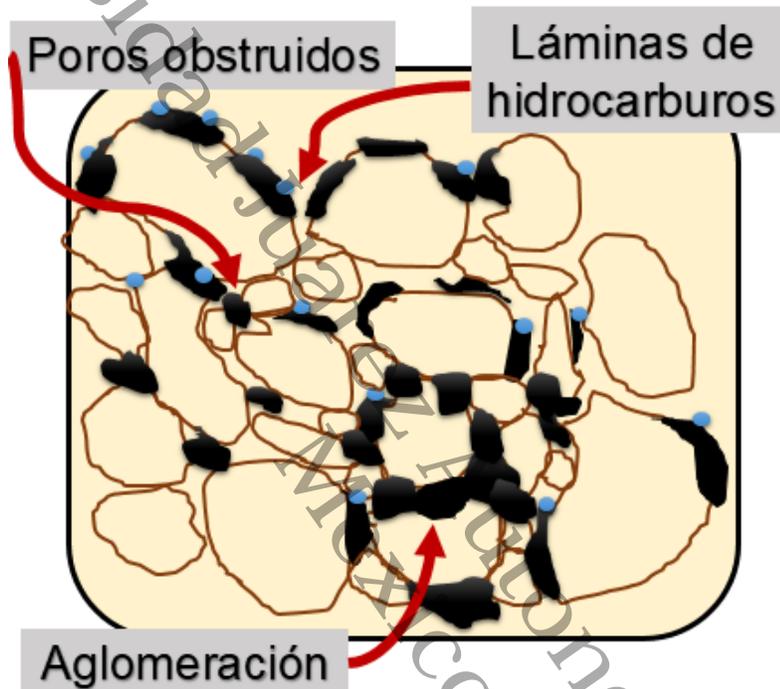


Ilustración del suelo y como se ve afectado por la presencia de hidrocarburos de petróleo.

#### 3.1.1 . Formación de láminas de hidrocarburos en los agregados del suelo.

La textura del suelo lleva a cabo un papel importante en estos casos puesto que el porcentaje de arcillas, limos, arenas o materia orgánica es un factor considerable a evaluar en un suelo que puede ser más vulnerable que otro en la formación de láminas de hidrocarburo residual.

Aquellos suelos donde predominen las arenas, presentan menos retención de humedad, sobre todo después de un periodo de sequía. Es por esto que son vulnerables después de haber sido contaminados por hidrocarburo, ya que la fracción residual forma una lámina meteorizada sobre las partículas del suelo, así lo reportó Adams et al. (2008), como cito en Roy y McGill (2000). Esta lámina de hidrocarburos

interfiere con la interacción normal entre el agua y las superficies del suelo. En particularidad, dificulta que se moje el suelo (repelencia al agua), y aunque se humedezca, se mantiene menos la humedad. Durante periodos de sequía, se secan más temprano en la temporada y se secan más, muchas veces hasta perder su cobertura vegetal.

### **3.1.2. Aglomeración de partículas del suelo.**

Cuando los hidrocarburos son degradados en el suelo se presenta una fracción residual que llega a intemperizarse con el tiempo, esta presenta una consistencia viscosa que posee una gran densidad. Al entrar en contacto con las partículas del suelo se genera una formación aglomerante entre ellas; los hidrocarburos, en su mayoría el de fracción pesada, tiene un efecto de pegamento que ocasiona que las partículas más pequeñas se agrupen entre sí, formando aglomeraciones de mayor tamaño, generando grumos que por su alta densidad y viscosidad se adhieren unas con otras. Adams et al. (2008) reportó el efecto entre como un crudo de fracción pesada actúa como aglomerante. "Pegando las partículas finas en el suelo (arcillas) en partículas más gruesas (tamaño de arena)" (Adams et al. 2008).

A niveles microscópicos el efecto que sucede básicamente en el recubrimiento de las partículas por el hidrocarburo residual, lo que genera el efecto de adhesión entre ellas provocando su aglomeración y dificultades en el intercambio catiónico.

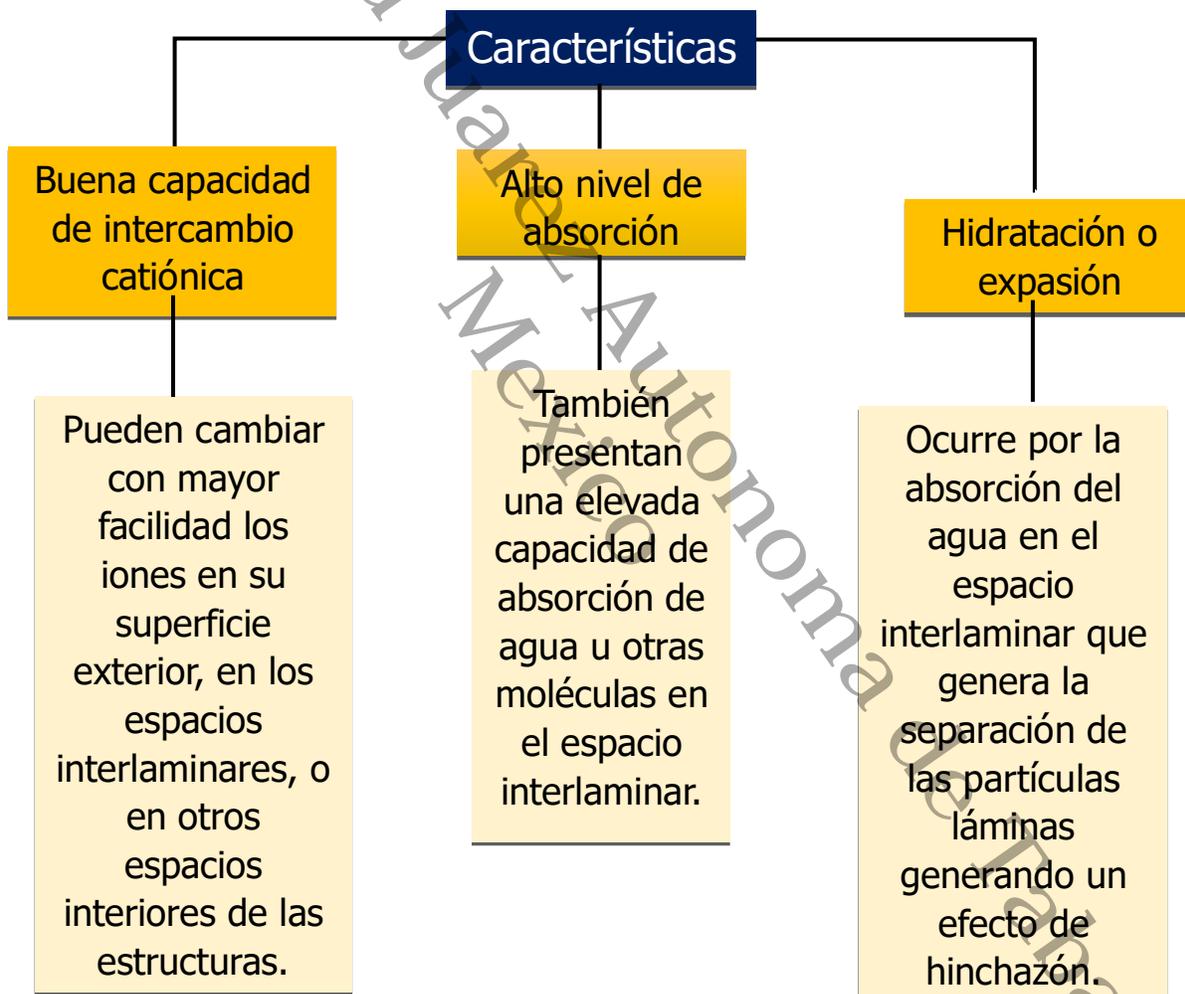
### **3.1.3. Obstrucción de poros.**

Debido a la estructura química de los hidrocarburos de petróleo, cuando son vertidos en el suelo existe una fracción que se volatiliza, mientras que otra es aprovechada por la actividad microbiana. Sin embargo, una fracción prevalece en el suelo obstruyendo el espacio poroso. Esto produce un efecto de compresión en el suelo que interfiere en sus procesos naturales y reduciendo su permeabilidad.

### 3.2. Influencia del tipo de arcillas en el suelo y la cantidad de materia orgánica.

#### 3.2.1. Arcillas (esmectitas.)

Las esmectitas son filosilicatos, un grupo de minerales de la arcilla que está compuesto por la pirofilita, beidelita y montmorillonita, entre otros, que tienen origen en suelos poco alcalinos o neutros con elevadas concentraciones de silicio o magnesio, algunas de sus cualidades son que poseen una gran capacidad de intercambio catiónico.



### 3.2.2. **Afectaciones en los suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo que poseen mayor cantidad de esmectitas.**

Debido a sus propiedades cuando las láminas de arcillas se hinchan por la presencia de agua y se encuentran alteradas por la presencia del contaminante estas pueden generar problemas de anegamiento por el taponeo de poros, lo cual ocasiona una baja o poca infiltración; zonas pantanosas son las más vulnerables ya que pueden ocasionar pérdida de vegetación por el exceso de humedad que genere pudrición en las raíces y condiciones anóxicas. Otra característica de los suelos ricos en esmectitas es que estos interactúan diferentemente en sí, podría ser el caso de los aluviones, aunque esto depende del porcentaje de esmectitas que estos presenten.



Suelo arcilloso de lomeríos alterado altamente por hidrocarburos de petróleo. Municipio de Centro, Tabasco (2023).

A diferencia de otros suelos con otro tipo de partículas, más finas que se tienden a aglomerar a sí mismo, dejando expuesto superficies de partículas más gruesas que posiblemente sean repelentes o causen problemas de compactación.

### 3.2.3. **Afectaciones en suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo que presentan menor cantidad de esmectitas o no tienen.**

Otros suelos que poseen finos y contienen un menor porcentaje de esmectitas o no lo tienen, presentan otras características, algunos de estos podrían llegar a ser algunos aluviones o tierra roja con características de finos como los limos, y las caolinitas e illitas que son arcillas no expansivas. Se pueden producir problemas de compactación si están contaminados con hidrocarburos pesados o intemperizados. Es posible que esta compactación puede reducir la posibilidad de mojar las

superficies de las partículas internas, y así también reducir la capacidad de campo. Adicionalmente, en concentraciones altas, los hidrocarburos captan más energía solar (por su color oscuro) y podrían subir la temperatura del suelo, causando estrés hídrico en las raíces de las plantas.

Por otra parte suelos como los arenosos, los cuales presentan muy poca o nula cantidad de arcillas y limos sufren otros efectos en comparación con aquellos con arcillas, ya que las propiedades de estas interactúan principalmente con la capacidad de retención de humedad y los suelos arenosos son más vulnerables a sufrir repelencia al agua y reducción en la capacidad de campo, ya que al no haber partículas con las características de las arcillas, los hidrocarburos recubren las partículas de arena e interfieren con la interacción del suelo y el agua ocasionando los problemas mencionados.



Suelo arenoso de la costa contaminado con crudo pesado o intemperizado con problemas de repelencia. Municipio de Cárdenas, Tabasco (2022).

**3.2.4. Principales impactos en suelos por la presencia de hidrocarburos tabla 1.**

SUELO	ALTERACIÓN	IMPACTO
<b>Pantanosos.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obstrucción del intercambio gaseoso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones de anoxia para el suelo</li> </ul>
<b>Tierra roja.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aglomeración de partículas.</li> <li>• Formación de láminas de hidrocarburo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactación.</li> <li>• Reducción en la capacidad de campo.</li> </ul>
<b>Arenoso de la costa.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Láminas de hidrocarburo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Repelencia.</li> <li>• Reducción en la capacidad de campo.</li> </ul>
<b>Aluviones.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aglomeración de partículas.</li> <li>• Poros obstruidos (mayor porcentaje de esmectitas).</li> <li>• Láminas de hidrocarburos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactación (menor porcentaje de esmectitas).</li> <li>• Reducción en la capacidad de campo.</li> <li>• Repelencia.</li> </ul>

*NOTA.* En la tabla 1. Se mencionan los suelos predominantes de Tabasco y las alteraciones físicas que pueden sufrir por hidrocarburos de petróleo que generen impactos a su aprovechamiento (fertilidad).

## **Materia Orgánica (MO).**

La materia orgánica es un factor que se debe considerar al momento de evaluar un suelo, puesto que esta podría ser un indicador de fertilidad, actividad biológica y retención de humedad. La MO posee una buena capacidad de intercambio catiónico lo cual genera una mayor interacción entre los demás componentes del suelo como el agua y los minerales. La presencia de un suelo fértil se podría considerar como un parámetro de abundante MO ya que favorece la retención de nutrientes que provoca la proliferación y actividad biológica, (Morales Bautista, 2014). Define el aprovechamiento de las sustancias húmicas que pueden alterar la



Suelo con buen porcentaje de materia orgánica (indicador de actividad biológica).

degradación de compuestos orgánicos a través de adsorción, degradación por hidrólisis y fotodescomposición. Los suelos que tienen mucha materia orgánica, amortiguan todos los efectos negativos, ocasionados por la presencia de hidrocarburos de petróleo y son más resilientes, menos susceptibles a deteriorar su fertilidad cuando se contamine.

## **IV. Características de los hidrocarburos de petróleo y cómo influyen en la remediación.**

Los hidrocarburos de petróleo se pueden clasificar de diferentes maneras. La industria petrolera clasifica el petróleo y sus refinados según su densidad específica, que es relacionada por una fórmula a sus Grados API, también conocido como Gravedad API. Hay una tendencia que los de menor densidad (mayor Grados API, °API) tienen mayor cantidad de hidrocarburos aprovechables después de la refinación, en especial gasolinas y destilados medios (diésel, gasóleo). Para este fin, la industria ha definido el petróleo en Súper ligero, Ligero, Mediano, Pesado y Extrapesado.



Hidrocarburo (posiblemente entre fracción media a pesada) en proceso de degradación en suelo arenoso. Municipio de Cárdenas, Tabasco (2022).



Sitio con residuos de hidrocarburo removido por fuga causando anegamiento. Municipio de Centro, Tabasco (2024).

Estas definiciones no tienen una relación con la clasificación de fracciones de hidrocarburos utilizados por parte de las dependencias ambientales (p.ej. USEPA, SEMARNAT/ASEA), que con son definidos según el número de carbonos en la fracción de hidrocarburos. Cabe mencionar también, que no todos los hidrocarburos en la misma fracción (ambiental) tienen las mismas propiedades. Algunos son alcanos lineales, otros alcanos ramificados o cíclicos, también aromáticos de un solo anillo, de dos anillos y de varios anillos (los Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares – HAPs), además de algunos naftenos (de doble enlace entre carbonos), y las nombradas resinas y polares, (que incluyen átomos de oxígeno, azufre y nitrógeno, además de hidrógeno y carbono). Finalmente, se define de manera operativa a los asfaltenos, como la fracción no soluble en pentano o hexano. Estos hidrocarburos tienden a tener pesos moleculares muy altos, muchos grupos fenílicos alquilados y son poco reactivos en términos de toxicidad. Los asfaltenos no son cuantificados por los métodos de norma actual en México y no son considerados tóxicos (pero sí pueden causar

problemas en la fertilidad del suelo). En muchos casos, aunque son hidrocarburos en la misma clasificación ambiental, pueden tener propiedades muy diferentes en términos de toxicidad, potencial cancerígeno, dispersión en el ambiente, capacidad de ser biodegradado, y su impacto en las propiedades de fertilidad del suelo.

#### 4.1. Características de los hidrocarburos.

En la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, las fracciones de hidrocarburos son definidos como Fracción Ligera (de 5-10 carbonos), Fracción Media (C11-28), y Fracción Pesada (C29-40). Sin embargo, en la última clasificación de la EPA son clasificados como Ligera (C5-8), Mediana (C9-17), y Pesada (C18-32) (figura 1). De acuerdo a estudios toxicológicos, los hidrocarburos de más de 32 carbonos no se encuentran relevantes respecto a la toxicidad para los seres humanos, por lo tanto no son considerados en esta. Es por esto que se recomienda tomar como referencia la información propuesta (EPA, 2022).

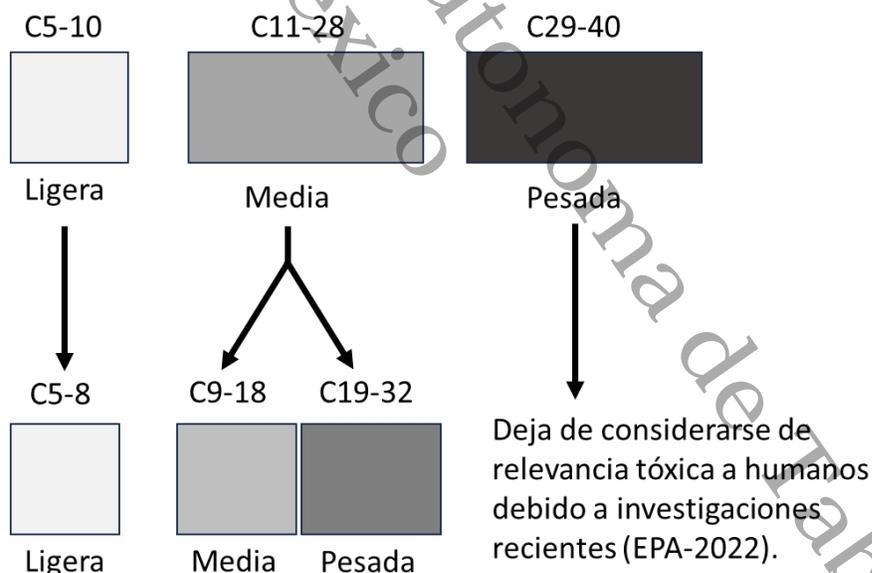


Figura 1. Comparación entre la clasificación de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y la EPA (2022).

Por otra parte, en la norma actual (NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012), están combinados los compuestos aromáticos y alifáticos en cada fracción, pero en la clasificación reciente de la EPA, además de ser clasificados como ligera, media y pesada, se clasifican aparte los alifáticos y los aromáticos. Esto es debido a las diferentes propiedades de toxicidad y potencial cancerígena que tienen estos dos grupos.

#### **4.2. Tipos de fracciones (y número de carbonos).**

Fracción Ligera (alifática), 5-8 Carbonos y BTEX (aromáticos).

Consiste en hidrocarburos altamente tóxicos, sobre todo el hexano. Además, tienen características de solventes y se disuelven las membranas celulares de los seres vivos. Adicionalmente, los BTEX pueden tener una potencia cancerígena, sobre todo el Benceno. Sin embargo, las estructuras químicas de este grupo son sencillas y son fáciles de biodegradar en concentraciones no-tóxicas. Por otra parte, son muy volátiles en el ambiente tropical, y normalmente se volatilicen cuando son derramados en la superficie del suelo o cuerpos de agua, en aprox. 6 meses.

Fracción Media (alifática), 9-18 Carbonos, Naftaleno/2-Metilnaftaleno (aromáticos).

En general, son menos tóxicos de la fracción ligera, pero algunos compuestos en este grupo pueden ser más tóxicos o un poco más persistentes, sobre todo porque son menos volátiles. Son fáciles de biodegradar por parte de los microorganismos y generalmente no causan problemas a largo plazo en términos de fertilidad del suelo.

Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAPs): aparte de los di-aromáticos mencionados previamente, este grupo (de tres anillos o más), generalmente es de baja toxicidad, pero algunos tienen potencia cancerígena (sobre todo el Benzo(a)pireno). Por otra parte, tienen una leve tendencia de reducir la respuesta

inmunológica en muchos seres vivos. Debido a sus propiedades particulares, son normados no tanto como grupo, pero como compuestos individuales. Los de tres anillos son relativamente fáciles de biodegradar, pero su capacidad de ser biodegradado se reduce con el número de anillos, así como su viscosidad y su dispersión en el medio ambiente. Son especialmente comunes en petróleo crudo pesado y extrapesado, así como en derrames antiguos (intemperizados) o en sitios que han sufrido quemas. Aunque generalmente son solo una proporción pequeña del petróleo o refinados, en algunos casos los límites máximos permisibles impuestos por las dependencias ambientales (SEMARNAT/ASEA), pueden ser muy bajas, sobre todo cuando son cancerígenos.

#### Fracción Pesada (alifática), 19-32.

Esta fracción corresponde aproximadamente a la segunda mitad de lo que anteriormente se denominaba la fracción media. Así que representa la más pesada de la anterior fracción media. Consiste casi por completo de alcanos ramificados, algunos cíclicos, así como los naftenos (de doble enlace entre los carbonos). Es de muy baja toxicidad, de muy baja dispersión en el medio ambiente, pero mucho más difícil de biodegradar. Pueden causar problemas con la fertilidad del suelo.

#### Fracción C32+, Resinas/polares y Asfaltenos.

Son los principales responsables para los problemas de fertilidad en suelo, aún en concentraciones muy bajas, a veces en conjunto con los hidrocarburos de la fracción C19-32. Cabe mencionar que los métodos analíticos empleados en la actual norma (NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012), generalmente no cuantifican los asfaltenos y los resinas/polares (aunque sí causan problemas en la productividad agropecuaria). Esto es porque la norma está orientada de la toxicidad del suelo (sobre todo a seres humanos), y no hacia la recuperación y preservación del recurso natural que es el suelo. Estos tipos de hidrocarburos son prácticamente imposibles de biodegradar o

tratar por oxidación química, únicamente por incineración (a precios muy altos), por estabilización/solidificación (con gestión por un Estudio de Riesgo Ambiental – ERA), o por disposición final en un centro autorizado. Sin embargo, el impacto que tienen sobre la fertilidad del suelo puede ser mitigado usando técnicas de restauración de manera sencilla y de bajo costo empleando métodos agrícolas y enmiendas químicas y orgánicas.



Mortandad de vegetación en sitio contaminado por fuga de hidrocarburo tóxico. Municipio de Centro, Tabasco (2023).



Hidrocarburo altamente intemperizado en complejo procesador de gas, Cd. Madero, México (2016).

## **V. Consecuencias sociales de cumplir con el aprovechamiento del suelo.**

En el sector petrolero se generan inconvenientes y problemáticas en la operabilidad, algunos son de índole accidental, otros por falta de mantenimiento al equipo o maquinaria, y en ocasiones por negligencia. El estado de Tabasco al ser un área de alta influencia de actividad petrolera, se encuentran varios kilómetros de ductos que transportan desde petróleo crudo hasta refinados, lo cual ocasiona una interacción con la población que al generarse problemáticas termina involucrando a la comunidad cercana.

Esto puede generar una gran negatividad hacia las empresas privadas que bajo contratos trabajen para la paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) puesto que el daño a su imagen por parte de la población aumenta gradualmente y esto crea barreras de comunicación y entendimiento con los ejidatarios, ganaderos, agricultores y demás población.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,  
Mexico

### 5.1. Sanciones y derechos ambientales. Tabla 2.

Legislación en materia ambiental	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Artículo 203. (2024).</li> </ul>	Toda aquella persona que contamine o deteriore el ambiente de tal forma que afecte los recursos naturales, será responsable de sus actos y estará obligado a reparar los impactos negativos hacia el ambiente que se hayan generado
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Artículo 204. (2024).</li> </ul>	De haberse presentado daños o perjuicios a la parte afectada esta podrá solicitar a la secretaria un dictamen técnico el cual tendrá valor en caso de ser presentado en un juicio.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Código Civil Federal. Enfocado en materia Ambiental. Artículo 1913. (2021).</li> </ul>	El uso de mecanismo, instrumentos, aparatos o sustancias peligrosas ocasionen adversidades al ambiente, la persona responsable está obligada a responder por el daño que cause.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Código Penal Federal; Delitos Contra el Ambiente y la Gestión Ambiental. Artículos 414 y 415 (2024).</li> </ul>	Sanciones, actividades tecnológicas y peligrosas que por sus características representen un riesgo como el almacenamiento, producción, tráfico, importación, exportación, transporte, abandono, desecho o descargue que por exponerse al medio ambiente de manera ilícitamente o sin aplicar medidas de prevención o seguridad.

*NOTA.* En la tabla 2. Se mencionan la legislación ambiental que expone la reparación de daños y perjuicios a quien se le perjudique su propiedad por alguna actividad externa o ajena al propietario.

### 5.2. Beneficios de atender el descontento social de la comunidad para el aprovechamiento del suelo.

Cuando se generan incidentes con la población se tiende a generar una barrera de comunicación por la falta de credibilidad y confianza entre las empresas y la comunidad. Es por ello que, de atenderse, se pueden lograr los siguientes puntos y se pueden beneficiar de un buen entendimiento con las personas.

- Evitar bloqueos que generen pérdidas en las horas de operatividad.
- Cuidar la imagen social de la empresa hacia la población.
- Impedir pérdidas económicas por incidentes con la población (bloqueos).
- Evitar demandas por la vía civil debido a una mala relación con las comunidades.



Propietario observando daños a su predio de productividad por derrame de hidrocarburos, Municipio de Centro, Tabasco (2023).

## VI. Estrategias para tratar problemas de aprovechamiento en el suelo.

### 6.1 Importancia de remediar suelo superficial y subsuelo aparte.

En el caso de los tratamientos *ex situ* se altera la naturalidad del suelo para su recuperación y poder ser devuelto a su lugar de origen (si es el caso) con la finalidad de liberar el sitio.

Sucede entonces que durante estos procesos se remueve la capa superficial y del subsuelo hasta la profundidad en donde se considere que presente adversidades por la exposición del contaminante para su remediación. Sin embargo, la cantidad de materia orgánica (y arcilla) presentada en el horizonte O y A no es la misma que se encuentra en el horizonte B y C. A pesar de esto, todo el suelo es removido y tratado sin tener en cuenta la cantidad de materia orgánica que se reduce, a pesar de que el



Perfil de suelo donde se percibe más de un horizonte. Municipio de Huimanguillo, Tabasco.

tratamiento sea exitoso y no presente toxicidad y se encuentre por debajo de los límites o no genere alguna otra problemática.

Esta mala práctica dependiendo el caso de estudio, involucra principalmente rezagos de problemas en el suelo tal y como es la reducción de fertilidad.

En adición a este problema de la materia orgánica, la cantidad de arcilla en los horizontes O y A es casi siempre mucho menor que en el horizonte B. En muchos suelos de la región, al mezclar los horizontes O, A y B se incrementa la cantidad de arcilla en los horizontes superficiales. Frecuentemente, esto cause una reducción en la permeabilidad del suelo, causa anegamiento durante el periodo de lluvias, condiciones anóxicas y finalmente, la pudrición de las raíces de las plantas. Adicionalmente, puede resultar en compactación, una reducción en el intercambio natural de gases entre el suelo y la atmósfera, así como la penetración de raíces.

En la actividad de extraer todo el suelo contaminado (superficial y subsuelo) para su tratamiento y posteriormente ser devuelto al sitio donde se tomó, involucra la mezcla de los horizontes y esto representa adversidades para la fertilidad sobre todo en suelos de uso agrícola o pastoreo. Domínguez - Rodríguez et al. (2020) expone sobre un sitio que fue remediado mediante lavado de suelo y oxidación química el cual no presentó problemas de toxicidad ni concentraciones por encima de los límites máximos permisibles, sin embargo, sí presentó compactación, reducción en la capacidad de campo y retención de humedad, lo cual condicionó su fertilidad y su aprovechamiento. Llevaron a cabo la comparación de una muestra de suelo del mismo sitio, colindante a la zona contaminada donde se realizó la remediación. Se concluyó que el deterioro de la fertilidad en este suelo se debió principalmente a la mezcla de horizontes superior (franco) e inferior (arcillo limoso a franco arcilloso limoso) durante el tratamiento de remediación. Otro factor importante fue la reducción de materia orgánica, probablemente causada por el tratamiento de oxidación química. Cabe mencionar que esta reducción en la materia orgánica del suelo no solo ocurre por oxidación química, pero también por biorremediación. Al estimular los microorganismos con nutrientes inorgánicos, no solo consumen los hidrocarburos del petróleo, pero también parte de la materia orgánica del suelo.

Se sugiere que, durante el estudio de caracterización del sitio, al momento de evaluar el perfil del suelo, se contemplen los tipos de suelos y composición de los horizontes al realizar

la remediación ya que en el tratamiento se debe incluir el proceso por separado del suelo superficial y el subsuelo. La tecnología sería la misma simplemente contemplando el porcentaje de materia orgánica no se vea afectado. De igual forma otra medida a contemplar, es igualar el porcentaje de materia orgánica presentada en el suelo colindante al remediado en las distintas profundidades de estratos al momento de regresar el suelo tratado a su lugar de origen (adición de enmienda orgánica post-remediación).

## 6.2 La repelencia al agua tratada con desorción alcalina complementada con enmienda orgánica y fitorrestauración.

La repelencia al agua es una problemática que se presente en el suelo aun posteriormente a la remediación debido a la presencia de hidrocarburos residuales meteorizados que a través del tiempo generan una lámina delgada que recubre las partículas del suelo. Esto ocasiona que después de un periodo determinado la capacidad de adsorción de agua se vea reducida. "En sitios contaminados con hidrocarburos, la repelencia al agua tiende a aparecer en suelos que sufren una sequía prolongada en algún momento después del derrame, o que están muy secos en el momento en que ocurre un derrame" (Adams et al., 2008 citando a Roy et al., 2003).



Muestras de suelo con problemas de repelencia al agua.

Este parámetro tiende a variar afectando los diferentes tipos de suelos, ya que algunos son más vulnerables que otros en cuando a problemas de repelencia al agua. Los suelos arenosos pueden verse más afectados debido a su menor cantidad de arcilla y materia orgánica, baja retención de humedad y mayor espacio poroso.

Particularmente esta problemática no se atiende debido a que surge en pasivos ambientales o sitios que han sido liberados bajo la condicionante de no presentar adversidades

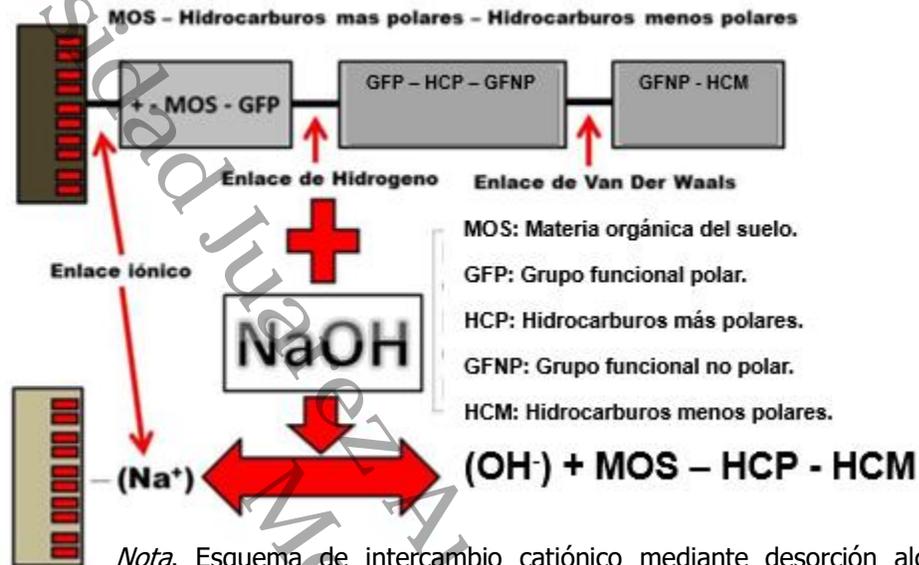
toxicológicas o concentraciones por encima de los Límites Máximos Permisibles. Estas complicaciones generan que exista una mayor presencia de hidrocarburo residual trasladando la presencia de humedad y materia orgánica en los espacios porosos, generando complicaciones de repelencia. Esto propicia que aquellos suelos de uso agrícola donde abundan las partículas de arena se vean gravemente afectados.

Para determinar si un suelo sufre condiciones de repelencia al agua se deben realizar pruebas de WDTP (Water Drop Penetration Time) la cual consiste en llevar a cabo la absorción de una gota de agua en determinado tiempo y saber si el suelo presentaba repelencia. Desde un punto de vista práctico y sin que haya algún significado físico especial en ello, un suelo se considera repelente al agua si una gota de agua colocada sobre su superficie tarda más de 5 segundos en ser absorbida completamente. (Dekker & Jungerius, 1990 citado por Jaramillo, 2006). De igual forma mediante el uso del método MED (Molarity Ethanol Droplet) donde se usa una gota de etanol a diferentes molaridades donde se mide de igual manera el tiempo de adsorción de la gota para cuantificar las concentraciones a la que penetra en el suelo.

La repelencia al agua puede ser tratada mediante una tecnología de remediación fisicoquímica conocida como desorción alcalina. "Su base consiste en que los hidrocarburos que están en el suelo pueden ser removidos por intercambio catiónico; es decir, que las cargas positivas de la materia orgánica en el suelo son sustituidas con cationes minerales" (Alejandro Álvarez 2015) mediante la aplicación de hidróxido de sodio (NaOH) para generar un intercambio catiónico entre el químico añadido y el hidrocarburo residual arraigado a las partículas del suelo. Alejandro Álvarez (2015) cito a Adams (2011) en donde menciona la reacción que sucede en el suelo al llevar a cabo el proceso de la desorción alcalina. Al añadir una solución de NaOH este se separa en  $\text{Na}^+$  y  $\text{OH}^-$ , lo cual provoca que inicie una interacción con los compuestos del suelo. El propósito es que las capas de hidrocarburo que están adheridas al suelo mediante puentes de hidrogeno y fuerzas de Van Der Waals se rompan y reaccionen con el hidróxido agregado, ya que el  $\text{Na}^+$  toma el lugar de las cargas positivas de la materia orgánica sustituyéndolas de las partículas del suelo, mientras que el  $\text{OH}^-$  desplaza las cargas negativas (figura 2).

“Esto da como resultado que la relación superficie mineral - materia orgánica se rompa, separando los hidrocarburos que se encuentran unidos a la materia orgánica, mediante el proceso químico que se forma al aplicar la desorción alcalina” (Alejandro Álvarez 2015).

**Figura 2 Superficie mineral del suelo, cargada negativamente**



*Nota.* Esquema de intercambio catiónico mediante desorción alcalina. Tomado de Alejandro Álvarez (2015) que cito a Adams y Guzmán (2011).

Al final del tratamiento por desorción alcalina, el complejo de sustancias orgánicas repelentes (incluyendo hidrocarburos y la MOS) se quitan de la superficie del suelo y tienden a formar grumos con una característica asfáltica en el suelo, que son de muy baja o nula toxicidad y que son prácticamente inerte en el suelo y no causan repelencia sobre las superficies minerales en el suelo.

Se nota en esta figura que además de quitar el complejo de hidrocarburos repelentes al agua (MOS-HCP-HCM), de la superficie del suelo, también se quita toda la materia orgánica del suelo, lo que ayuda de impartir fertilidad. Además, posterior al tratamiento químico el suelo puede sufrir problemas de exceso de sodio y exceso de alcalinidad. Para combatir esto, es importante regar el suelo post- tratamiento químico, o realizar el tratamiento durante un periodo natural de lluvias abundantes (Sept.-Oct., en el Sureste Mexicano). Igualmente, para superar la pérdida de la materia orgánica natural de la superficie del suelo es necesario reponerla, en forma de una enmienda orgánica (comúnmente un desecho agrícola o composta) y restaurar la fertilidad empleando una pastura.

Mediante la aplicación de la aplicación únicamente de la desorción alcalina, Alejandro Álvarez (2015) llevó a cabo un tratamiento en el cual utilizo cinco muestras de un suelo arenoso contaminado por hidrocarburos de petróleo con problemas de repelencia al agua. Al inicio del muestreo se midieron parámetros de pH de las diferentes muestras el cual rondaba en cinco, hidrocarburos totales de petróleo (HTP) que iban desde los 16,113 hasta los 63,109 mg/kg, por último, la concentración MED que estaba entre 10.3 y 11.6 N (se requería una solución con etanol a una normalidad de 0.1 N para que el agua infiltraba en menos de 10s). Al finalizar el tratamiento con desorción alcalina encontraron que el pH era superior a 9 en todas las muestras, la concentración más elevada de HTP era de 7,496 y el resto estaba por debajo de los 5,000 mg/kg de suelo, con este tratamiento se bajó la repelencia a 4.5 a 1 N (MED, 10s). Siendo esta tecnología bastante eficiente en la reducción de la repelencia y también en HTP.

Sin embargo, una de las adversidades que se podrían afrontar sería la alta alcalinidad que se presenta en el suelo después de la aplicación del NaOH. Las precipitaciones anuales podrían servir para lavar dichos excedentes de sales, pero esto seguiría siendo una complicación en base al uso del suelo que se vería afectado. Es por ello que se debe contemplar una medida biológica que amortigüe el efecto alcalino de esta tecnología, siendo esta la enmienda orgánica que funciona como reductor del pH, repelencia al agua y propiciando la proliferación de los organismos del suelo. La función de la materia orgánica consiste en una mejoría notoria en la estabilidad del suelo, a la cual se le adjudica una buena capacidad de retención de humedad, capacidad de intercambio de iones, mejora la aireación y se fijan los nutrientes que fomentan la actividad biológica en el suelo.

El uso de la enmienda orgánica como una medida complementaria en una remediación puede ser aplicable. Córdova Alvarado (2010) llevó a cabo una prueba con cachaza de caña utilizando suelo limpio, contaminado y biorremediado. En el suelo que había sido biorremediado utilizó cuatro muestras a las cuales le adiciono 0, 1, 2, y 4% de enmienda orgánica (cachaza de caña), el suelo contaminado consto de una muestra con 2% de cachaza y por último el de control para comparar el progreso de las muestras anteriores. Se observó que durante el periodo experimental en el suelo biorremediado ocurrió una drástica disminución en el WDTP, en donde se adiciono 1% de cachaza, las horas de adsorción de la gota de agua fueron de 431,022 como horas iniciales a 68 horas finales mientras que en donde se utilizó 4% de enmienda orgánica mostro una reducción de 551,296 horas a tan

solo 2. En la muestra contaminada se redujo 923 veces según el valor inicial cuantificado siendo esa de 15.07 a 0.0016 horas.

Por otra parte, al llevar a cabo este tipo de tecnología de remediación aplicando la parte fisicoquímica y biológica, también da lugar a la fitorrestauración, ya que al haber una reducción del contaminante y un acondicionamiento favorable para la proliferación de la vida biológica (las plantas en particular) se puede considerar las plantas como parámetros de mejoría y fomentar dicha mejoría en el suelo, ya que estas al expandir sus raíces dan firmeza al suelo y adicionan materia orgánica la cual principalmente aumenta la retención de humedad y mejora las condiciones de capacidad de campo. Zavala Cruz et al. (2005) llevaron a cabo un estudio con la finalidad de evaluar el efecto de derrames de petróleo sobre el suelo y la producción de biomasa de pastos tropicales. Reportando que los HTP se vieron reducidos debido a la presencia de pastizales en un periodo de tres meses y medio mostrando así su potencial para la fitorremediación debido a su adaptación en suelos contaminados.

### **6.3 Problemáticas como la compactación y baja capacidad de campo pueden ser tratados mediante arado profundo, aplicación de enmienda orgánica y fitorrestauración.**

La compactación del suelo y la baja capacidad de campo son dos problemas diferentes. Sin embargo, ambos pueden ser causados por contaminación de hidrocarburos de petróleo. En suelos de uso agrícola estos dos parámetros son realmente importantes, ya que un suelo fértil para su producción de materia prima requiere de una buena capacidad de campo. Por otra parte, la compactación se puede producir como consecuencia de hidrocarburo residual combinado con el pisoteo del ganado en áreas de sobrepastoreo o por el constante paso de maquinaria que provoca la compactación, principalmente en suelos arcillosos. Estos son más



Suelo con problemas de compactación.

vulnerables a este problema y por ello tener un sitio compactado, se pueden producir problemas de retención de humedad, dificultad de penetración en las raíces de los cultivos y estrés hídrico en las plantas.

Cuando ocurre un derrame y el hidrocarburo es meteorizado con el paso del tiempo, este cambia sus características afectando directamente las partículas del suelo. Adams et al. (2008) menciona que los hidrocarburos residuales reducen la capacidad del suelo de volver a sus condiciones originales. La estructura química de los hidrocarburos residuales presenta "terminales pegajosas", las cuales incrementan su viscosidad y adherencia en el suelo (Adams et al., 2008).

Por otra parte, está la capacidad de campo como factor para la fertilidad del suelo ya que si disminuye afecta directamente la productividad del sitio puesto que los cultivos dependen directamente de la buena retención de humedad; esto favorece la actividad biológica y conserva la materia orgánica que a su vez está asociada con la fertilidad.

Los suelos con estas problemáticas pueden ser tratados mediante el arado o labranza; la finalidad de esto es producir un efecto de ruptura en la parte superficial del suelo que se encuentre firme. Valencia Montenegro. (2013) expone la utilidad de esta técnica en el suelo, generando procesos de esponjamiento o hinchamiento el cual se va produciendo según las propiedades de densidad aparente y porosidad del suelo. El arado produce sobre el suelo fuerzas ascendentes que de acuerdo con la profundidad se pueden aplicar distintas maquinarias. "Trabajo superficial (menos de 15 cm) se puede efectuar con escarificadores o cultivadores. De 15 a 40 cm se utiliza el arado de cincel y a profundidad mayor el subsolador" (Valencia Montenegro, 2013).

Parte de la función es reducir la presencia de aglomeraciones (terrones) del suelo, a través de la fragmentación de estas, debido a la presión que se les ejerce. Sin embargo, un parámetro a considerar en esta etapa son las condiciones de humedad que contenga el suelo en ese momento, ya que mientras más elevadas sean más complicados será llevar a cabo esta tarea. Es por ello que se recomiendan situaciones donde la humedad este reducida (como estaciones de mayor sequía). Se suelen utilizar discos que pueden cortar y enterrar la vegetación que se encuentre presente, mediante el proceso rotativo de los discos o rodillos.

Sin embargo, un suelo el cual ha sido homogenizado no garantiza su recuperación total ya que aunque este no presente compactación si existirán consecuencias que se generan por esta misma problemática, tales como la reducción en la capacidad de campo y la concentración de materia orgánica. Es por ello que se debe aplicar una enmienda orgánica que ayude a la restauración del suelo y propicie actividades biológicas naturales. Si bien no se estaría empleando una técnica de biolabranza que involucre algún sedimento o lodo contaminado de manera controlada, se sustituiría por una enmienda orgánica que genere una bioestimulación en los microorganismos nativos del suelo que comenzarían a generar situaciones favorables en la fertilidad e integración de materia orgánica en el suelo para la producción primaria del sitio.

Impactando directamente en la capacidad de campo puesto que al aumenta la fracción orgánica (enmienda orgánica) da lugar a condiciones de buena humedad y nutrientes que generan la actividad microbiología y den lugar al rendimiento de las plantas. Córdova Alvarado (2010) analizó los efectos de la cachaza de caña (enmienda orgánica) en suelo remediado y reporto efectos positivos en el aumento de la capacidad de campo en presencia de la cachaza, puesto a que a mayor porcentaje de enmienda orgánica se genera un aumento en la capacidad de retención de humedad del suelo.

Si bien entonces se tiene un suelo con problemas de compactación y capacidad de campo debido a la presencia de hidrocarburo residual, se puede restablecer a sus condiciones originales mediante una restauración con la aplicación de técnicas de labranza y adición de materia orgánica. Por otra parte, se debe contemplar otra medida complementaria como la fitorrestauración para tratar ambos problemas. Valencia Montenegro (2013) llevó a cabo una prueba de labranza vertical para un sitio de producción de caña de azúcar donde expone que esta actividad es recomendable para preparar suelos para su cultivo. De esta forma si se tiene un suelo que ha sido homogenizado y acondicionado con enmienda orgánica favorece las condiciones de retención de humedad, lo cual estimula la actividad microbiológica y propicia el crecimiento de los cultivos los cuales, a través de sus raíces penetran el suelo y evitan la aglomeración de partículas y compactación.

Por otra parte, durante el proceso de fitorrestauración, generalmente en suelos compactados se puede llegar a pensar que las raíces no tendrían la suficiente capacidad para regresar el suelo a sus condiciones antes de la problemática. Sin embargo, la pastura de raíz fina posee ciertas características en su desarrollo ya que el crecimiento de la misma raíz va de los 0 –

10 cm principalmente y llega hasta los 30 cm en algunos casos. Brance Bonvine et al (2023) reportó un estudio del crecimiento de la alfalfa (pastura que crece en suelos fértiles) en el cual indica que el crecimiento de las raíces es uniforme (0 – 30 cm) y aumenta la biomasa. Este comportamiento de las raíces favorece la penetración de superficial de suelos que hayan sufrido compactación y la fitorrestauración sucede en extensiones más amplias de suelo, generando que poco a poco la estructura del suelo se vaya cambiando y de lugar a la humedad y aireación, reduciendo así la compactación. Sin embargo, para suelos que presenten este problema se recomienda pastos más resistentes y que se adapten mejor, tal es el caso del *Brachiaria humedicola*, según lo reportado por Zavala Cruz et al (2005) en el cual se encontró que los pastos como estos tienden a prevalecer en suelos que hayan sufrido impactos por hidrocarburos de petróleo en un tiempo después de hasta 3.5 meses que haya sido sembrado en suelo contaminado.

Es por esto que estas medidas de labranza, enmienda orgánica y fitorrestauración se aplican para combatir estas problemáticas ya que funcionan como un ciclo simbiótico que depende el uno del otro para generar las condiciones favorables que superen la presencia de hidrocarburo residual en suelo y permitan su restauración.

#### **6.4 Situaciones de anegamiento se contrarrestan con la alteración al drenaje o estabilización químico-biológica.**

El anegamiento es el proceso que afecta al suelo por una pérdida del balance hídrico del suelo, este se puede generar de manera natural en suelos con elevados porcentajes de arcillas debido a su alta capacidad de retener la humedad. O bien también se presente en campos de cultivos en los cuales se puede producir un exceso de irrigación y produce un excedente de humedad, llegando a generar incluso problema de salinización puesto que en estos predios durante las temporadas de sequías se evapora la humedad y generar una mayor presencia de sales que se depositaron por el excedente de agua en un suelo que ha sido productor de materia prima, alterando así el proceso natural de evapotranspiración, escorrentía natural del terreno y percolación.



Sitio con problema de inundaciones temporales.

Sin embargo, el anegamiento también puede ser producto de un suelo que sufrió afectaciones por hidrocarburos residuales que generen adversidades como la compactación que da lugar a esa problemática hídrica.

Por otra parte, se tienen las condiciones climáticas como parámetro puesto que en sitios donde las precipitaciones anuales sean elevadas como el estado de Tabasco donde reporta el INEGI (2023) existe una precipitación media estatal de 2,550 mm anuales, las lluvias se presentan todo el año, siendo más abundantes en los meses de junio a octubre. Así mismo se debe contemplar la ubicación geográfica de cada sitio puesto que en el estado de Tabasco algunos predios presentan inundaciones estacionales.

Romero et al. (2016) toman de referencia a Striker (2012) sobre como sucede el anegamiento, que produce una alta saturación de humedad en los poros del suelo llegando a formar una capa de agua en la superficie del suelo. Esto genera afectaciones en la fertilidad del suelo puesto que reduce la actividad biológica por la baja presencia del intercambio de oxígeno en el suelo, afectando el crecimiento de las plantas por el exceso de humedad presente. Romero et al. (2016) reporta la toxicidad como adversidad por anegamiento puesto que al presentarse una disminución en el intercambio de gases en el suelo ocasiona cambios electroquímicos; "inducidos por microorganismos que utilizan productos químicos oxidados como aceptores de electrones, aumentando la concentración de compuestos potencialmente tóxicos, como las formas reducidas de manganeso ( $Mn^{+2}$ ), hierro ( $Fe^{+2}$ ), ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y azufre ( $S^{-2}$ )" citando a Araki et al. (2012), Colmer y Voeselek (2009).

Una de las medidas que se opta como solución rápida es la alteración en el drenaje natural del suelo. Tomando en cuenta el desnivel o condiciones geográficas se altera el flujo natural de escorrentía del agua, hacia zanjas o pozas donde el agua se almacene evitando que continúe ocurriendo este excedente de humedad, como punto positivo a esta medida se presenta que es una oportunidad para la creación de jagüeyes que son embalses que tienen la finalidad de la captación y acumulación del agua con la finalidad de usarse como para el ganado o riego. Una desventaja es que la alteración al drenaje no es una solución final puesto que el problema persistiría después de un tiempo ya que el suelo sigue contando con sus propiedades de mayor retención de humedad.

Por otra parte, existe una tecnología de remediación para suelos que han sufrido contaminación que involucra procesos de estabilización y humificación que resulta en la inmovilización del contaminante que se encuentre en el suelo (Guzmán Osorio 2011). Mediante la aplicación de hidróxido de calcio que reacciona con la adición de agua se separa en  $\text{Ca}^{+2}$  y  $2(\text{OH})^-$  y estabiliza los contaminantes del suelo. Posteriormente se aplica un acondicionador orgánico que ajusta los parámetros de fertilidad del suelo generando una bioestimulación en la actividad microbiana. Finalmente se emplea la siembra de pasto como medida indicadora de la fertilidad del suelo tratado.

Esta técnica también tiene la efectividad en propiciar la fertilidad del suelo y reducir la contaminación por sales, reduciendo concentraciones de sodio, conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio. Guzmán Osorio (2011) que citó a Álvarez (2008) encontró que el suelo a tratar forma un sustrato fértil por la edición de una enmienda orgánica fértil para la siembra de pastos o vegetación. Guzmán Osorio (2011). Que toma de referencia a Adams (2004), menciona que esta tecnología consiste de tres etapas:

- Reacción puzolánica  
La cual consiste en "solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos hidratados" (Guzmán Osorio 2011).
- Reacciones de humificación (condensación química de las moléculas orgánicas).  
Esta se produce en la lignina que pasa a través de cambios en oxidación y condensación de biomoléculas como aminoácidos. Guzmán Osorio (2011) consultó a Dòmenech y Peral (2006) y describe el proceso de la formación de material húmico por la oxidación de polifenoles o quinonas que se condensan como productos de bajo peso molecular.

- Mineralización del contaminante (oxidación biológica).  
Esta ocurre en condiciones aeróbicas en procesos de oxidación del contaminante volviéndose un agregado del suelo y cambiando sus características fisicoquímicas en relación al suelo.

Un ejemplo de la factibilidad que puede representar el crecimiento de una cobertura vegetal posterior a la remediación es lo reportado por Guzmán Osorio (2011). Durante la aplicación de la técnica de estabilización químico – biológico es una celda que contenía suelo contaminado con graves problemas de repelencia al agua. El tratamiento consistía en la aplicación de un agente alcalino el cual produciría una interacción con los hidrocarburos presentes, pero también, alteraría el pH del suelo por cual también se usó una adicción de enmienda orgánica. Para finalmente comprobar el comportamiento de la vegetación se aplicó el uso de pastos de raíz fina como el humidicola (*Brachiaria humidicola*), algunas de las características de este pasto es que presenta resistencia a condiciones fuertes en temporadas de sequias, bajo porcentaje de fertilidad en suelo e incluso a la compactación generado por pisoteo.

Durante el monitoreo de la celda, este pasto demostró una gran capacidad de resistencia ya que estableció una cobertura vegetal la cual favoreció la retención de humedad, redujo la temperatura en el suelo y genero las condiciones para que otras especies se asociaría no identificada de la familia de las Ciperácea pudiera germinar naturalmente.

La aplicación una fitorremediación en este caso género las condiciones para que el sitio tratado química y biológicamente, pudiera proliferar la actividad biológica y el suelo pueda soportar las estaciones más extremas.

En suelos con problemas de anegamiento se puede pensar que la adición de una enmienda orgánica solo aumentara la retención de humedad en suelo. Sin embargo, Córdova Alvarado (2010) realizó una prueba donde mide los efectos de agregar materia orgánica en el suelo, incluyendo la capacidad de campo, la cual baja después de un periodo de tiempo de haber agregado la enmienda ya que sucede un efecto de mineralización en el humus del suelo. Este parámetro no es negativo si se contempla un suelo con problemas de exceso de humedad. Para sostener la cantidad de materia orgánica en el suelo, es necesario establecer una cobertura vegetal.

## 6.5 Recomendaciones.

En otros aspectos, se podrían llegar a producir ciertas complicaciones de pH y salinidad en algunos sitios, debido a la presencia del sector petróleo, generalmente contaminación por aguas de producción que estén destinadas a ser tratadas y por algún incidente termine ocasionando daños al ambiente. "El agua de producción o formación es agua que generalmente tiene un alto contenido de sales disueltas proveniente de las formaciones geológicas (domos salinos) de los yacimientos de petróleo de donde se extrae" (Adams et al., 2008). Aunque no es una contaminación directa de hidrocarburos de petróleo, estos problemas podrían producirse.

Sin embargo, para fines de este trabajo no se abordan otros casos de contaminación que presenten alteraciones y afectaciones en el suelo que no sean directamente ocasionados por la presencia de hidrocarburos de petróleo.

Se presenta información bibliográfica de referencia como sugerencia para más información del tema.

- Solís Pérez et al. (2019, sep-dic). Factibilidad ecológica de dos técnicas de remediación según las propiedades de un suelo aluvial contaminado con aguas congénitas. Actividades antropogénicas de Tabasco y sus impactos asociados desde las perspectivas de los grupos de investigadores de la UJAT. 5(15), 39-57

## **VII. OBSERVACIONES GENERALES**

Es importante considerar o aplicar uso de las estrategias que se proponen como medida para contrarrestar los problemas a la fertilidad causados por los hidrocarburos de petróleo que afecten el aprovechamiento del suelo.

Posteriormente a la ejecución de un programa de remediación que se esté llevando a cabo o incluir dentro del mismo programa la medida que mejor le convenga al sitio será el factor de cambio en la preservación de la vocación natural del suelo establecida en el programa de ordenamiento ecológico vigente.

Es necesario abordar la falta que existe en la legislación ambiental sobre este parámetro (aprovechamiento) al momento de liberar un sitio contaminado por hidrocarburos de petróleo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco,  
Mexico

## VIII. Referencias

- Adams, R. H., Zavala-Cruz, J., y Morales-García, F. (2008). Concentración Residual de Hidrocarburos en Suelo del Trópico. ii: Afectación a la Fertilidad y su Recuperación. *Interciencia*, 33(7), 483-489. Recuperado en 03 de agosto de 2023, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442008000700005&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700005&lng=es&tlng=es)
- Adams, R.H. y Morales García, F.A. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. I: consideración para la salud pública y protección al ganado. *Interciencia*, 33 (7), 476-482. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933702>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2022) Resúmenes de Salud Pública - Hidrocarburos totales de petróleo [Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)] Recuperado de: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs123.html#](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html#)
- Alejandro Álvarez, L.A. (2015). Aplicación Secuencial de la Tecnología Desorción Alcalina para Remediar un Suelo Arenoso Hidrofóbico Contaminado con Petróleo Crudo Procedente De Bemidji, Minnesota. (Tesis de maestría en gestión ambiental). Universidad Autónoma de Guadalajara, Campus Tabasco.
- Cámara De Diputado Del H. Congreso De La Unión. (2010). Código Civil Federal, D.O.F. Reformado el 28 de enero del 2010. Recuperado de: <https://www.oas.org/dil/esp/C%C3%B3digo%20Civil%20Federal%20Mexico.pdf>
- Cámara De Diputado Del H. Congreso De La Unión. (2024). CODIGO PENAL FEDERAL, D.O.F. Reformado el 17 de enero del 2024. Recuperado de: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPF.pdf>
- Córdoba Alvarado, A. (2010). Efecto de los Hidrocarburos sobre las Propiedades Físicas y Químicas de un Suelo, y su Atenuación Mediante la Adición de Cachaza de Caña. (Tesis de licenciatura en Ing. Ambiental). Universidad Juárez Autónoma De Tabasco.
- Dekker, & Jungerius P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement* 18: 173-183
- Domínguez Rodríguez V.I. Adams, R.H., Vargas-Almeida, M., Zavala-Cruz, J. y Romero-Frasca, E. (2020). Fertility Deterioration in a Remediated Petroleum – Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (2), 382. MDPI AG. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17020382>
- Guzman Osorio, F. J. (2011). Escalamiento Industrial de la Técnica de Estabilización Químico – Biológica para la Remediación de Suelo Contaminado con Hidrocarburos. (Tesis de maestría en ciencias ambientales). Universidad Juárez Autónoma De Tabasco.

- Morales Bautista, C. M. (2014). Evaluación de la Contaminación con Hidrocarburos del Petróleo sobre Suelos Aluviales del Trópico Mexicano. (Tesis Doctoral de ciencias en ecología y manejo de sistemas tropicales). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Morales-Bautista, C. M., Lobato-García, C. E., Flores-Jiménez, J. y Méndez-Olán, C. (2019). Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos. *Acta Universitaria*, 29, 1–14. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2154>
- Romero R., Silva P., Seguel O. (2016). Anegamiento y su efecto sobre la fisiología, crecimiento y rendimiento de trigo en zonas mediterráneas manejadas en cero labranzas. *Agro Sur*. 44(1), 47-57.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (1988). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. D.O.F. Reformada el 8 de mayo del 2023. Recuperado de: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Límites Máximos Permisibles De Hidrocarburos En Suelos Y Lineamientos Para El Muestreo En La Caracterización Y Especificaciones De Remediación. Diario Oficial. D.O.F. Reformada 10 de septiembre del 2013. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013#gsc.tab=0)
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. D.O.F. Reformada el 22 de mayo del 2015. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23. LEY GENERAL PARA LA PREVENCI N Y GESTI N INTEGRAL DE LOS RESIDUOS.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23_LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCI_N_Y_GESTI_N_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf)
- Valencia Montenegro, J. J. (2013). Impacto de la Labranza Vertical en un suelo de Terrazas Altas de la Planicie Aluvial y su Relación con la Producción de Caña de Azúcar. (Tesis de maestría en ciencias agrarias con énfasis en suelos, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio institucional – biblioteca digital UN.
- Zavala-Cruz, J., Gavi-Reyes, F., Adams-Schroeder, R.H., Ferrera-Cerrato, R., Palma-López, D.J., Vaquera-Huerta, H., & Domínguez-Ezquivel, J. (2005). Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 23 (3), 293-302.
- Brance Bonvini M.I., Banchio A., Nicolier J., Berhongaray, Álvarez R. (2023). Distribución vertical deraíces finas en pasturas perennes. Engormix. Página Web [https://www.engormix.com/lecheria/manejo-pasturas/distribucion-vertical-raices-finas\\_a51797/](https://www.engormix.com/lecheria/manejo-pasturas/distribucion-vertical-raices-finas_a51797/)

Universidad de



## 7.2 Tríptico e infografía informativo sobre el manual

Parte de los resultados que se obtuvieron posteriores al manual y su desarrollo fue la generación de un tríptico y una infografía los cuales al ser de libre acceso informativo y más breve capta de primera intención el interés del público en general para indagar en los temas abordados que se plasmaron en el manual como resultado principal de este proyecto. Este tríptico cumplió el propósito de ser más visualmente atractivo y captar la atención.

### Cara externa.

**Beneficios de atender el descontento social de la comunidad para el aprovechamiento del suelo**

- Evitar bloqueos que generen pérdidas en las horas de operabilidad.
- Cuidar la imagen social de la empresa hacia la población.
- Impedir pérdidas económicas por incidentes con la población.
- Evitar demandas por la vía civil debido a una mala relación con las comunidades.

**Para más información consultas sin costo al.**

- 99-33-58-15-00 extensión 6467
- drrandocan@hotmail.com
- academiadeextencionismo.ujat@gmail.com

**BUENAS PRÁCTICAS DE REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN SUELO AGRÍCOLA.**

**UJAT - DACBIOL  
LAB-REM  
LABORATORIO DE REMEDIACIÓN**

La infografía incluye imágenes de trabajadores en un campo, manos sosteniendo plantas jóvenes, y un logo que muestra un frasco de laboratorio con una planta y un engranaje.

## Cara interna.

### LA NORMATIVIDAD BASADA EN LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES.

Los cuales están:

Enfocados en la toxicidad de los hidrocarburos por su número de carbonos (5 máximo 32) en la Norma-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

¿Por qué toxicidad?

Para cumplir con el objetivo de la remediación (LGPGIR art;5)

El cual es:

- Eliminar o reducir contaminante hasta un nivel seguro para la salud.
- Prevenir dispersión en el ambiente

sin embargo NO con:

**Recuperar o restablecer sus condiciones para su aprovechamiento (LGEEPA art; 134).**

**Conclusión**

La norma-138 se enfoca en la toxicidad en el suelo que ponga en riesgo al ambiente y la salud humana, más no contempla la recuperación y preservación del suelo (aprovechamiento de este).

### ALTERACIONES EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO QUE AFECTAN SU APROVECHAMIENTO



#### Principales impactos en suelos por la presencia de hidrocarburos.

SUELO	ALTERACIÓN	IMPACTO
• Pantanosos.	• Obstrucción del intercambio gaseoso.	• Condiciones de anoxia.
• Tierra colorada.	• Aglomeración • Formación de laminas.	• Compactación. • Reducción en capacidad de campo.
• Arenoso de la costa.	• Laminas de hidrocarburos.	• Repelencia • Reducción en capacidad de campo
• Aluviones.	• Aglomeración. • Poros obstruidos • Laminas de hidrocarburos.	• Compactación. • Reducción en capacidad de campo. • Repelencia.

### ESTRATEGIAS PARA TRATAR PROBLEMAS DE APROVECHAMIENTO EN EL SUELO

#### IMPORTANCIA DE REMEDIAR SUELO Y SUBSUELO APARTE.

##### REPELENCIA.

Tratada mediante desorción alcalina con enmienda orgánica y fitorremediación.

##### COMPACTACIÓN O REDUCCIÓN EN LA CAPACIDAD DE CAMPO.

Tratada mediante arado profundo, aplicación de enmienda orgánica y fitorremediación.

##### ANEGAMIENTO POR COMPACTACIÓN.

Contrarrestarlas con alteración al drenaje o estabilización químico - biológico.

##### ALTERACION DE PH Y SALINIDAD POR AGUAS CONGENITAS (PARA CUALQUIER SUELO)

Fitorremediación y proceso de atenuación natural.

# BUENAS PRÁCTICAS DE REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO EN SUELO AGRICOLA.

## LA NORMATIVIDAD BASADA EN LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES

Esta enfocada en la toxicidad de los hidrocarburos por su número de carbono (5 máximo 32) en la Norma-138-SEMARNAT/SSA1-2012

Para cumplir con el objetivo de la remediación (LGPGIR).

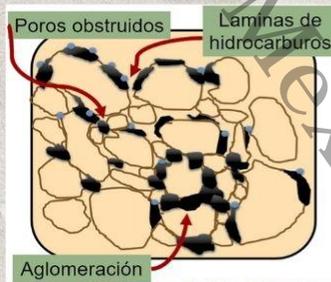
El cual es:

- Eliminar o reducir contaminante hasta un nivel seguro para la salud.
- Prevenir dispersión en el ambiente

sin embargo NO con:

**Recuperar o restablecer sus condiciones para su aprovechamiento (LGEEPA art; 134).**

## ALTERACIONES EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO QUE AFECTAN SU APROVECHAMIENTO



### Principales impactos en suelos por la presencia de hidrocarburos.

SUELO	ALTERACIÓN	IMPACTO
• Pantanosos.	• Obstrucción del intercambio gaseoso.	• Condiciones de anoxia.
• Tierra colorada.	• Aglomeración • Formación de láminas.	• Compactación. • Reducción en capacidad de campo.
• Arenoso de la costa.	• Láminas de hidrocarburos.	• Repelencia • Reducción en capacidad de campo
• Aluviones.	• Aglomeración. • Poros obstruidos • Láminas de hidrocarburos.	• Compactación. • Reducción en capacidad de campo. • Repelencia.

## ESTRATEGIAS PARA TRATAR PROBLEMAS DE APROVECHAMIENTO EN EL SUELO

- ➔ **IMPORTANCIA DE REMEDIAR SUELO Y SUBSUELO APARTE.**
- ➔ **REPELENCIA.**  
Tratada mediante desorción alcalina con enmienda orgánica y fitorremediación.
- ➔ **COMPACTACIÓN O REDUCCIÓN EN LA CAPACIDAD DE CAMPO.**  
Tratada mediante arado profundo, aplicación de enmienda orgánica y fitorremediación.
- ➔ **ANEGAMIENTO POR COMPACTACIÓN.**  
Contrarrestarlas con alteración al drenaje o estabilización químico - biológico.
- ➔ **ALTERACION DE PH Y SALINIDAD POR AGUAS CONGENITAS (PARA CUALQUIER SUELO)**  
Fitorremediación y proceso de atenuación natural.



- Javier Alberto Solís García.
- Dr Randy Howard Adams Schroeder.
- Dra Verónica Isidra Domínguez Rodríguez.

- 99-33-58-15-00 extensión 6467
- drrandocan@hotmail.com
- academiadeextencionismo.ujat@gmail.com

## 8. CONCLUSIONES

Posteriormente a los objetivos que se plantearon en este proyecto, de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Como primer punto se logró realizar un manual de buenas prácticas que cumplió con la finalidad de ser una herramienta de apoyo como consulta, referencia o introductorio al tema. Este es práctico y accesible para todo público, se presentan claramente las ideas e información de cómo esta herramienta cumple con el beneficio social que las empresas deben abordar hacia las comunidades respecto a temas que son de interés mutuo, como una responsabilidad civil.

- Se presentó la incongruencia presentada en la LGEEPA sobre el aprovechamiento del suelo mencionado y en el enfoque toxicológico de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 omitiendo la restauración de acuerdo al programa de ordenamiento ecológico vigente.
- Se presenta el descontento de la comunidad hacia las empresas encargadas del programa de remediación, por no atender las alteraciones a las características del suelo, afectando su aprovechamiento; generando negativas de operabilidad a las empresas.
- Para la conclusión de los proyecto de remediación se recomienda considerar las estrategias que se presentaron para propiciar el aprovechamiento del suelo contemplando la fertilidad.
- El manual de buenas prácticas de remediación y restauración de sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo en suelo agrícola concentra la información concreta sobre la vulnerabilidad del aprovechamiento del suelo por parte de la norma 138 y en las estrategias para contrarrestar esta situación. Con el apoyo complementario de un tríptico e infografía para divulgación.

## 9. REFERENCIAS.

- Adams, R. H, Domínguez Rodríguez, V. I. y Zavala, J. (2015). *Vibrio fischeri* Bioassay for Determination of Toxicity in Petroleum Contaminated Soils from Tropical Southeast Mexico. *Sains Malaysiana*. 44. 337-346. 10.17576/jsm-2015-4403-04.
- Adams, R. H, Zavala-Cruz, J., y Morales-García, F. (2008). Concentración Residual de Hidrocarburos en Suelo del Trópico. II: Afectación a la Fertilidad y su Recuperación. *Interciencia*, 33(7), 483-489. Recuperado en 03 de agosto de 2023, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442008000700005&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700005&lng=es&tlng=es)
- Adams, R.H. y Morales García, F.A. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico. I: consideración para la salud pública y protección al ganado. *Interciencia*, 33 (7), 476-482. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933702>
- Alejandro Álvarez, L.A. (2015). *Aplicación Secuencial de la Tecnología Desorción Alcalina para Remediar un Suelo Arenoso Hidrofóbico Contaminado con Petróleo Crudo Procedente De Bemidji, Minnesota*. (Tesis de maestría en gestión ambiental). Universidad Juárez Autónoma De Tabasco.
- Besoain M. E. (1985) *Mineralogía de arcillas de suelos* [en línea]. San José, Costa Rica: Serie de Libros y Materiales Educativos - Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. no. 60. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/46477>
- Cámara De Diputado Del H. Congreso De La Unión. (2010). *Código Civil Federal, D.O.F. Reformado el 28 de enero del 2010*. Recuperado de: <https://www.oas.org/dil/esp/C%C3%B3digo%20Civil%20Federal%20Mexico.pdf>
- Cámara De Diputado Del H. Congreso De La Unión. (2024). *Código Penal Federal, D.O.F. Reformado el 17 de enero del 2024*. Recuperado de: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPF.pdf>
- Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C. (5 abril 2017). *Ganan amparo campesinos y pescadores de Tabasco por contaminación de Pemex*. Reporte de Nota. <https://www.cemda.org.mx/ganan-amparo-campesinos-y-pescadores-de-tabasco-por-contaminacion-de-pemex/>

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (5 de febrero de 1857). Derechos Humanos y Garantías. Art 27.  
<https://www.supremacorte.gob.mx/sites/default/files/cpeum/documento/2017-03/CPEUM-027.pdf>
- Córdoba Alvarado, A. (2010). Efecto de los Hidrocarburos sobre las Propiedades Físicas y Químicas de un Suelo, y su Atenuación Mediante la Adición de Cachaza de Caña. (Tesis de licenciatura en Ing. Ambiental). Universidad Juárez Autónoma De Tabasco.
- Dekker, & Jungerius P. D. 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement* 18: 173-183.
- Domínguez Rodríguez V. I. Adams, R. H, Vargas-Almeida, M., Zavala-Cruz, J., y Romero-Frasca, E. (2020). Fertility Deterioration in a Remediated Petroleum – Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (2), 382. MDPI AG. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17020382>
- García Villanueva, L. A. Fernández Villagómez, G. (2014). Determinación del perfil de benceno y de hidrocarburos de fracción ligera en el suelo del pasivo ambiental de la ex-refinería "18 de marzo", Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 201-211. Recuperado en 07 de agosto de 2023, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000200007&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200007&lng=es&tlng=es).
- Guzmán Osorio, F. J. (2011). Escalamiento Industrial de la Técnica de Estabilización Químico – Biológico para la Remediación de Suelo Contaminado con Hidrocarburo. (Tesis de maestría en ciencias ambientales). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Guzmán-Osorio, F. J., Adams, R. H. (2015). Mitigation of Water repellency in the treatment of contaminated muds using the chemical – biological stabilization process. *International Journal of Environmental Science and Technology*. *Ciencia. Tecnología*, 12, 2071–2078 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0606-z>
- Independent Statistic and Analysis. U.S. Energy Information Administration. (2023). Petroleum & other liquids. Date Base. <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. (2017). Mosaico nacional de los terrenos rurales y sus principales características.  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/amca/amca2017\\_07.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2017/amca/amca2017_07.pdf)

- Jordán López, A. (2006). Manual de Edafología. Recuperado. AcademiaEdu. Base de datos. de: [https://www.academia.edu/6005589/Manual\\_de\\_edafologia\\_jordan](https://www.academia.edu/6005589/Manual_de_edafologia_jordan)
- Julca-Otiniano, Alberto, Meneses-Florián, Liliana, Blas-Sevillano, Raúl, & Bello-Amez, Segundo. (2006). La Materia Orgánica, Importancia y Experiencia de su uso en la Agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Morales Bautista, C. M. (2014). Evaluación de la Contaminación con Hidrocarburos del Petróleo sobre Suelos Aluviales del Trópico Mexicano. (Tesis Doctoral de ciencias en ecología y manejo de sistemas tropicales). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Morales-Bautista, C. M., Lobato-García, C. E., Flores-Jiménez, J., y Méndez-Olán, C. (2019). Cambios en las propiedades físicas y químicas de un suelo debido a un proceso de restauración aplicado a un derrame de hidrocarburos. *Acta Universitaria*, 29, 1–14. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2154>
- National Weather Service. (2023). Information center. Data Base. <https://www.weather.gov/about/#>
- Romero et al. (2016). Anegamiento y su efecto sobre la fisiología, crecimiento y rendimiento de trigo en zonas mediterráneas manejadas en cero labranzas. *Agro Sur*. 44(1), 47-57. <http://revistas.uach.cl/pdf/agrosur/v44n1/art05.pdf>
- Roy, J. & McGill, W. (2002). Assessing Soil Water Repellency Using the Molarity of Ethanol Droplet (Med) Test. *Soil Science*. 167. 83-97. 10.1097/00010694-200202000-00001.
- Secretaria de Energía de México. (2021). Sistema de Información Energética. Producción de petróleo crudo por entidad federativa. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=PMXB1C02>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). Atlas Digital Geográfico [http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm\\_climas.html#:~:text=En%20el%20territorio%20nacional%20se,Fr%20C3%ADo%20con%20la%20m%20C3%ADnima%20superficie.](http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html#:~:text=En%20el%20territorio%20nacional%20se,Fr%20C3%ADo%20con%20la%20m%20C3%ADnima%20superficie.)

- Texas P. & Wildlife. Texas Ecoregions. Data Base. <https://tpwd.texas.gov/education/hunter-education/educacion-para-cazadores/chapter9/ecorregiones#:~:text=Esta%20%C3%A1rea%20en%20el%20norte,son%20principalmente%20arenosas%20a%20margosas>
- Texas Water Development Board. (2004) Chapter 4. The Rule of capture. (PDF File). [https://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered\\_reports/doc/R361/4%20CH%20Caroom.pdf](https://www.twdb.texas.gov/publications/reports/numbered_reports/doc/R361/4%20CH%20Caroom.pdf)
- United States Census Bureau. (2022). Measuring America's People, Places, and Economy. Informative note. <https://www.census.gov/newsroom/press-releases/2022/population-estimates-counties-decrease/population-estimates-counties-decrease-spanish.html>
- Valencia Montenegro, J. J. (2013). Impacto de la Labranza Vertical en un suelo de Terrazas Altas de la Planicie Aluvial y su Relación con la Producción de Caña de Azúcar. (Tesis de maestría en ciencias agrarias con énfasis en suelos, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio institucional – biblioteca digital UN.
- Velázquez, Roque. (2017). Bloqueo A Pemex Genero Perdidas Por \$15 Millones. Diario Oficial de Colima. <https://diariodecolima.com/noticias/detalle/2017-01-05-bloqueo-a-pemex-genero-perdidas-por-15-millones>
- Viñas, M. (2005). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. (Tesis de Doctorado en Biología Universidad de Barcelona). Recuperado de [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/2396/TESIS\\_MVINAS\\_CANALS.pdf](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/2396/TESIS_MVINAS_CANALS.pdf)
- Zavala-Cruz, J., Gavi-Reyes, F., Adams-Schroeder, RH, Ferrera-Cerrato, R., Palma-López, DJ, Vaquera-Huerta, H., & Domínguez-Ezquivel, J. (2005). Derrames de petróleo en suelos y adaptación de pastos tropicales en el Activo Cinco Presidentes, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 23 (3), 293-302.