

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Proyecto de Integración de Ingeniería Ambiental

**Restauración de un suelo contaminado con combustóleo mediante métodos
secuenciales biofisicoquímicos**

Presenta

Mariana Armienta Gutiérrez Itzel Chantal Mendoza Escobar

Matrícula: 2113009262 Matrícula: 2123031454

Asesores:

Dr. Israel Labastida Núñez M. en C. Margarita Beltrán Villavicencio

Departamento de Energía

Dr. Juan Carlos Álvarez Zeferino

Departamento de Energía

Trimestre 20 - O
19 de marzo del 2021
México, Ciudad de México

Resumen

La industria del petróleo en México ha repercutido en la contaminación del ambiente debido a un gran número de sitios contaminados, en algunos casos por una mala *praxis* en las tareas de exploración y explotación y en otros por accidentes, que causan derrames en suelos. Las tecnologías de restauración de suelos de tipo fisicoquímicas y biológicas son la alternativa para su restauración.

En este proyecto se evaluó la remediación de un suelo contaminado con combustóleo, en primera instancia el suelo se caracterizó fisicoquímicamente con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000, se tomó como referencia un suelo testigo de la zona, sin influencia de contaminación. El suelo contaminado presentó una textura arenosa, color negro, un pH de 6.7 unidades, una conductividad eléctrica de 0.18 dS/m, 20.24% de materia orgánica, un contenido de nutrientes alto para nitrógeno, medio para fósforo y nivel traza para potasio, se reportó una concentración inicial de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) de $69,676.7 \pm 7,297.4 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$ fracción pesada.

Para la restauración del suelo contaminado, se llevó a cabo un tren de tratamiento que consistió en una secuencia de dos lavados y composteo posteriormente. El proceso de lavado se realizó por lotes y se utilizó un tensoactivo sintético (Tween 80), con una concentración de 0.5% w/v, con agitación durante 24 h.

El composteo se llevó a cabo en un biorreactor, a temperatura constante de 34° C, con una permanencia de 45 días, se agregó 16.4% de sargazo como cosustrato. Al término de la etapa de lavado se presentó una eficiencia de 52.39 % y después del composteo, la eficiencia total del tren de tratamiento fue del 94.25%, se logró reducir la concentración hasta $3,919.3 \pm 753.8 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$ que se encuentra dentro de los límites permisibles que establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, para el uso de suelo industrial y comercial de $6,000 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$.

Posterior al tren de tratamiento y una vez restaurado el suelo, se llevó a cabo una prueba de fitotoxicidad según la guía OCDE 208, se emplearon semillas de pepino (*Cucumis sativus*), se tuvo como referencia el suelo sin contaminar (testigo positivo) y el suelo contaminado (testigo negativo). El suelo restaurado cumplió los lineamientos de la guía ya que presentó un 100% de emergencia, 100% de sobrevivencia, no presentó clorosis ni efectos visibles en las plantas, un 16% de inhibición en la longitud de las plantas respecto al testigo positivo.

Dedicatoria - Itzel Chantal Mendoza Escobar

A mi papá, que es mi ángel que me cuidó y que nunca me dejó sola en cada etapa de mi vida, que en cada obstáculo él me enseñaba que nos teníamos el uno para el otro para enfrentarnos a cualquier cosa, que me enseñó a dar siempre amor y respeto a todo lo que me rodea, a ti papá que me enseñaste a sonreír siempre, que me das los mejores abrazos, para ti que siempre serás el mejor padre de la historia.

A mis hermanas, Ingrid y Andrea que las amo desde el primer día que las cargué en mis brazos, son lo más importante y divertido que tengo, me ayudan a olvidar los malos días, les agradezco por siempre apoyarme y por ayudarme a tener la fuerza para luchar por lo que más quiero.

A mi esposo Angel Martinez Saldaña, que ha estado a mi lado durante diez años a pesar de todas las adversidades, gracias por apoyarme incondicionalmente y darme esa fuerza de levantarme cuando yo pensaba que todo se estaba derrumbado, a ti amor, que me llenas de alegrías, que me haces sonreír a carcajadas, pero, sobre todo, que has sido mi cómplice y hemos logrado nuestros sueños siempre, gracias por todo tu amor incondicional, CTMSyCTMA.

A mi madre, que lucho contra todos para estar siempre juntas, trabajó duró para poderme sacar adelante y me enseñó a nunca rendirme por lo que quiero, a ser visionaria siempre; a ti mamá por darme la educación que tengo para poder superarme día con día.

A toda mi familia que siempre presentaron sus buenos deseos para mí y sé que me quieren.

A la familia Saldaña que siempre me hicieron sentir como en mi hogar y siempre me brindaron una comida y un vaso de agua.

A mis amigos (as) que terminaron sus carreras primero, pero eso no les impidió seguir apoyándome y seguir divirtiéndonos.

A mí, que cuando estuve a punto de rendirme siempre había algo que me daba fuerzas y me hacía seguir luchando, nunca me rendí ante ningún obstáculo, y eso me enorgullece, porque creo que luchar contra uno mismo es la batalla más fuerte que existe.

Dedicatoria - Mariana Armienta Gutiérrez

A los que perdí: Ángela Carrillo, Vicenta Gutiérrez, Gustavo Rey Velo y Tomás Armienta que me enseñaron lo que es la dignidad y como vivir mi vida con ella. Espero que en donde sea que se encuentren en este momento vean que todo lo que hago es por, para y de ustedes.

A mi madre Ma. Isidora Gutiérrez que, a través del ejemplo, me enseñó el trabajo duro, la bondad y sobre todo la valentía de perseguir todo lo que deseo sin importar cuales puedan llegar a ser las barreras, me enseñaste a crear mi propio criterio y a alzar la voz gracias por siempre darme tu amor y apoyo. ¡Esto no se acaba hasta que se acaba!

A Rolando Armienta que a pesar de sus propios demonios hizo lo mejor que pudo para ser una parte constante en mi vida.

A Orlando Armienta que siempre estuvo a mi lado jugando bajo la lluvia, que en nuestra adolescencia nos unió la música y en nuestra joven adultez siempre procuraste mi bienestar te amo, sin ti y tu apoyo mi vida hubiera tenido un gran vacío.

A Rolando Armienta gracias por cuidar mis heridas desde las más pequeñas y perceptibles hasta las que solo el amor infinito e incondicional puede curar. Gracias por siempre apoyarme hasta en la decisión más ilógicas y creer en mi palabra siempre. Gracias a eso pude florecer; tu amor y tú apoyo lo es todo para mí.

A mi prima, hermana y una madre más Ma. Eugenia Covarrubias gracias por abrirme las puertas de tu casa cuando mi corazón estuvo destrozado y ayudaste a sanar con un abrazo. Jamás dudes que siempre estaré a tu lado.

A Jesús Juárez a mi compañero de vida que se ha mantenido estoico a mi lado a pesar de las peores tormentas, hemos vivido lo inimaginable juntos y es por eso que podemos decir que nos amamos. Gracias por permitirme vivir los sueños más hermosos a tu lado y siempre sostener mi mano en momentos de soledad, este título también es tuyo.

A Luz María Sánchez por su ayuda a romper las barreras de mi corazón y así ayudarme a ser una mujer diferente. Lo único que tengo para usted es amor y agradecimiento infinito.

A mi amiga del alma Monserrat Navarro, a esa hermana que Dios me quitó y después me regresó en forma de amiga, a ti que hemos vivido las peores tormentas y los cielos más claros juntas, te amo, tu apoyo ha sido vital en mi vida en estos primeros veintiún años juntas.

A Carolina García que con su amistad está revolucionando mi mundo, gracias por enseñarme a vivir, a disfrutar.

Agradecimientos Itzel Chantal Mendoza Escobar

A la Maestra Margarita Beltrán Villavicencio quien siempre vio porque este proyecto terminara de la mejor manera, y quien me enseñó a que siempre hay que mejorar de una u otra forma, pero lo más importante que nunca me rinda.

Al Doctor Israel Labastida Núñez, quien me enseñó lo que era dar una buena exposición y quien al principio no confió en mí, pero después cambio de opinión.

Al Doctor Juan Carlos Álvarez Zeferino, quien me tuvo mucha paciencia y siempre estuvo ahí para ayudarme, y brindarme una buena taza de café, pero sobre todo para resolver todas mis dudas explicándome de la mejor manera.

A Laura Tecorralco, porque siempre me apoyó cuando los profesores no se encontraban en el área del laboratorio, y me sacaba de muchos apuros.

A la Universidad Autónoma Metropolitana por haber sido como un hogar para mí y todo un reto, me costó entrar a tu casa, es por eso que ahora valoro más cada asunto que tenga que ver contigo te agradezco por haberme formado como ingeniera.

Agradecimientos Mariana Armienta Gutiérrez

A la Universidad Autónoma Metropolitana que me levantó, me abrazó, me enseñó el significado de los sueños colectivos y me cambió para siempre.

A la Maestra Margarita Beltrán Villavicencio que nos apoyó a darle forma y un camino a nuestra idea sin jamás cortar nuestro espíritu de investigación. Que me dio la oportunidad de demostrar de lo que soy capaz sin importar ideas preconcebidas de mí, que siempre me trató con paciencia Franciscana y estuvo al tanto de todas las necesidades emocionales y académicas. El aprendizaje que obtuve de usted no sólo fue teórico sino también me enseñó cómo se puede ser una persona experta en un tema y aun así ser cordial y empática estaré eternamente agradecida con usted.

Al Doctor Israel Labastida Núñez que aceptó el trabajo de investigación, observó, apoyó y orientó el ímpetu e inquietudes de este proyecto. Siempre estaré agradecida por haber asumido de la manera más vehemente el arduo trabajo de transmitirnos sus conocimientos.

Al Doctor Juan Carlos Álvarez que con toda la pasión y paciencia Franciscana trabajó hombro a hombro conmigo, que me transmitió de la manera más apasionante todo el conocimiento que le costó años conseguir, pero más allá de las enseñanzas de su área de conocimiento le agradezco en las que me enseñaba el camino correcto como persona, sobre como relacionarme con los demás y que la constancia te lleva al lugar que tú deseas.

A mi compañera Chantal que gracias a su esfuerzo y constancia pudimos trabajar para llevar este proyecto a buen puerto.

Índice

Declaratoria	ii
Resumen.....	iii
Dedicatoria Itzel Chantal Mendoza Escobar.....	iv
Dedicatoria Mariana Armienta Gutiérrez	v
Agradecimientos Itzel Chantal Mendoza Escobar	v
Agradecimientos Mariana Armienta Gutiérrez.....	vii
Índice.....	viii
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Justificación	6
2 Objetivos	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos.....	7
3 Marco teórico	8
3.1 Contaminación de suelos con hidrocarburos.....	8
3.1.1 Contexto histórico de los hidrocarburos en México.....	10
3.1.2 Producción de hidrocarburos en México.....	11
3.2 Legislación en materia del suelo	12
3.3 Tecnologías de restauración de suelos	17
3.3.1 Tecnologías fisicoquímicas.....	17
3.3.2 Tecnologías biológicas.....	18
3.3.3 Tecnologías térmicas.....	20
3.3.4 Tecnologías mixtas.....	21
3.4 Lavado de suelos	21
3.4.1 Lavado de suelo	22
3.4.2 Tipos de tensoactivos para el lavado de suelos	24
3.5 Composteo	28

3.5.1 Sistema de composteo	28
3.5.2 Etapas de composteo	29
3.5.3 Aplicaciones de composteo	32
3.5.4 Sargazo	33
3.6 Estudios de caso de restauración de suelos con hidrocarburos	35
4 Metodología	37
4.1 Obtención del suelo	37
4.2 Caracterización fisicoquímica del suelo	38
4.3 Lavado con tensoactivo Tween 80 (etapa 1)	39
4.4 Concentración de hidrocarburos totales de petróleo, fracción pesada	40
4.5 Determinación de nitrógeno	42
4.6 Composteo en biorreactores (etapa 2)	44
4.6.1 Montaje del composteo intensivo	44
4.6.2 Monitoreo de las condiciones del composteo	45
4.7 Fitotoxicidad (etapa 3)	46
5 Resultados y discusión	49
5.1 Caracterización fisicoquímica inicial del suelo	49
5.2 Composteo intensivo	53
5.3 Concentración de hidrocarburos totales	55
5.4. Pruebas de viabilidad y fitotoxicidad	57
6 Conclusiones	63
7 Referencias	65

Lista de tablas

Tabla 1.1 Casos de estudio de restauración de suelos con hidrocarburos	4
Tabla 3.1 Valores máximos permisibles para especificaciones microbiológicas.....	13
Tabla 3.2 Concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg en base seca en compostas	13
Tabla 3.3 Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante	14
Tabla 3.4 Límites máximos permisibles en tipo de suelo	15
Tabla 3.5 Límites máximos permisibles en tipo de suelo	15
Tabla 3.6 Casos de restauración de suelos y resultados.....	35
Tabla 4.1 Caracterización del suelo antes y después de la restauración.....	39
Tabla 5.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de los suelos evaluados.....	50
Tabla 5.2 Concentraciones obtenidas de HTP y eficiencia de remoción del suelo estudiado en cada etapa de restauración concentración inicial 69676.7 ± 7297.4 mgHTP/kg suelo	55

Lista de figuras

Figura 3.1 Mapa de distribución de reservas por cuenca	12
Figura 3.2 Tratamiento in situ de lavado de suelos.	23
Figura 3.3 Proceso de lavado de suelos ex situ.	24
Figura 3.4 Esquema de remediación de suelos contaminados con tensoactivos.	25
Figura 3.5 Ácido perfluorooctanoico.	25
Figura 3.6 Dodecil sulfato de sodio.....	26
Figura 3.7 Ejemplos de tensoactivos catiónicos.	26
Figura 3.8 Tensoactivos anfóteros, Alquil Dimetil Betaína.....	26
Figura 3.9 Alquilfenol, ejemplo de tensoactivo no-iónico.	27
Figura 3.10 Estructura general del Tween 80.	27
Figura 4.1 Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en la experimentación.	37
Figura 4.2 Depósito de combustóleo fracturado.	38
Figura 4.3 Frasco con suelo contaminado y disolución de tensoactivo Tween 80.....	40
Figura 4.4 Ensamble del equipo para realizar la prueba Soxhlet para la extracción de los HTP	41
Figura 4.5 Ensamble para destilar el hexano y separarlo del combustóleo	42
Figura 4.6 Equipo ensamblado para la prueba Kjeldahl	43
Figura 4.7 Equipo ensamblado para la destilación rápida	43
Figura 4.8 Mezcla de suelo y sargazo antes de composteo	44
Figura 4.9 Montaje del reactor biológico.....	45
Figura 4.10 Rizotrones para la prueba de fitotoxicidad.....	47
Figura 4.11 Suelo en el proceso de humedecimiento a capacidad de campo.....	47
Figura 4.12 Rizotrones con una inclinación de 30° y cubiertos.	48
Figura 5.1 Reducción de volumen en el composteo intensivo.....	53
Figura 5.2 Suelo restaurado en la quinta semana de composteo.....	54
Figura 5.3 Monitoreo de temperatura semanal del composteo intensivo.....	54
Figura 5.4 Grafica de concentración de HTP en cada etapa de restauración del suelo.....	56
Figura 5.5 Prueba de viabilidad.	58
Figura 5.6 Parámetros de crecimiento: a) germinación de semilla al 50% respecto al testigo, b) quinto día de crecimiento, c) planta a los 21 días, d) raíz a los 21 días de crecimiento, e) parte aérea a los 21 días de crecimiento f) desmontaje de experimento, g) longitud de la raíz de suelo restaurado, h) longitud de los tres tipos de suelo	59
Figura 5.7 Longitud de la parte aérea de los tres suelos	60
Figura 5.8 Longitud de la especie vegetal en los suelos de la experimentación desde el día 0 hasta los 21 días	61

1. Introducción

México ocupaba el lugar 18 a nivel mundial en reservas probadas de petróleo, en el 2013, con 0.8% del total de crudo (BP Statistical Review of World Energy, 2013) y sigue posicionándose a nivel mundial. PEMEX (Petróleos Mexicanos), para el año 2019, contaba con reservas de aproximadamente 7,000 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (Statista Research Department, 2020). Debido a la mala *praxis* en las tareas de exploración, explotación y falta de mantenimiento de los pozos petroleros o por robo de combustible; frecuentemente los suelos del país quedan expuestos a siniestros ambientales. Estos acontecimientos alteran las características fisicoquímicas y biológicas de los mismos.

El suelo es un recurso finito, lo que significa que su pérdida y degradación no es recuperable en el transcurso de una vida humana de manera natural. Los suelos alterados impactan los cultivos que crecen en ellos y, en consecuencia, los alimentos que posteriormente se incorporan a la cadena trófica, también se contamina el agua por infiltración y el aire por los compuestos volátiles; esto obliga a buscar alternativas para la recuperación de este recurso (FAO, 2018).

En general, la biodegradación de hidrocarburos es difícil de lograr ya que está condicionada a diferentes variables, como pH, humedad, afinidad a los aceptores de electrones y nutrientes (Ávila, 1999), estas características han convertido a los hidrocarburos en uno de los principales problemas ambientales. Durante el año 2017 la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) recibió 655 notificaciones de emergencias ambientales, de las cuales, 259 fueron provocadas por derrames de hidrocarburos a nivel nacional (PROFEPA, 2018).

Las tecnologías de remediación de suelos son todas aquellas que tienen como principal finalidad reducir la toxicidad, movilidad o concentración del contaminante. Estas tecnologías pueden realizarse *in situ* (en el sitio) o *ex situ* (fuera del sitio), en condiciones aerobias o anaerobias (CORFO, 2019). Estos procesos se aplican con la finalidad de cumplir con los criterios establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012), que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo, la caracterización y especificaciones en la remediación. En suelos de uso predominantemente agrícola y residencial el límite máximo permisible es de 3,000 mg/kg para la fracción pesada, mientras que para la media es de 1,200 mg/kg y para la ligera 200 mg/kg. En suelo

industrial el límite es de 6,000 mg/kg para la fracción pesada, 5,000 mg/kg para la fracción media y 500 mg/kg para la fracción ligera (SEMARNAT, 2012).

Los distintos tratamientos biológicos que se aplican en la remediación del suelo se utilizan para degradar, transformar y remover los compuestos orgánicos tóxicos, incluso, dan como resultado la completa conversión de dichos compuestos en productos inorgánicos, como el H₂O, CO₂ o formas inorgánicas de N, P y S. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos y, por consiguiente, de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren *et al.*, 1997).

La fitorremediación implica la remoción de contaminantes de suelos y aguas mediante la interacción de rizósfera, agua, suelo y contaminante (Siciliano y Germida, 1998); sin embargo, la sola presencia de la planta en un sitio contaminado mejorará las condiciones ambientales, puesto que su raíz permitirá el aumento de las poblaciones microbianas y, por lo tanto, la degradación del contaminante. Se han desarrollado experimentos en laboratorio con pasto (Hernández *et al.*, 2016), lo que ha probado ser una técnica promisoriosa para recuperar suelos contaminados con petróleo y sus derivados, los resultados muestran la reducción de contenido de hidrocarburos en el suelo.

Por otra parte, el lavado es una técnica de restauración aplicada a suelos, en ésta, el suelo se pone en contacto con tensoactivos con el fin de disolver, suspender o precipitar el contaminante, lográndose así su transferencia a la fase acuosa. El lavado de suelos puede concentrar los contaminantes en un volumen menor de suelo, debido a la separación entre partículas finas y gruesas, disminuyendo así el volumen del material contaminado (Freeman, 1998).

Sin embargo, el lavado de suelo remueve los contaminantes existentes, aunque también produce una pérdida de nutrientes, por lo que el método de composteo es una alternativa para devolverle nutrientes y materia orgánica al suelo. Existen diferentes tipos de composta como la lombricomposta que consiste en sacar el máximo beneficio de las lombrices de tierra roja para ser utilizado como abono orgánico en suelos degradados, la composición y calidad de la lombricomposta está en función del valor nutritivo de los residuos que consume la lombriz, por lo tanto, un manejo adecuado de los residuos para formular una mezcla bien balanceada producirá una lombricomposta de excelente calidad (García *et al.*, 2013), la composta caliente está elaborada a base de estiércol (aunque este no siempre es necesario, ya que se puede agregar un sustrato diferente, como materia orgánica), tierra y agua, además de la reacción con el oxígeno proveniente del aire, lo que juega un papel fundamental en el proceso de

degradación y la composta básica con elaboración elemental. Para producir este tipo de composta se deben colocar varias capas de materia orgánica, el suelo contaminado y controlar que las condiciones de temperatura y humedad sean las adecuadas (CDI, 2008).

En este proyecto se evaluó la eficiencia de una secuencia de tratamientos para la restauración de un suelo contaminado con combustóleo, en el primer tratamiento se empleó un método fisicoquímico (lavado), seguido de un proceso de composteo en biorreactor utilizando sargazo como sustrato y por último un tratamiento de fitorremediación.

1.1 Antecedentes

La Tabla 1.1 presenta cinco casos de estudio diferentes sobre restauración de suelo contaminado con hidrocarburos, con el objetivo de alcanzar el mayor porcentaje de remoción del contaminante, en los que se mencionan variables como pH, nutrientes, la cantidad de nitrógeno, carbono y fósforo.

Tabla 1.1 Casos de estudio de restauración de suelos con hidrocarburos

Referencia	Título	Tipo de estudio	Resultados
(Chan 2015)	Evaluación de la degradación de hidrocarburos totales del petróleo por bioestimulación con abonos orgánicos asociados a especies arbóreas.	Bioestimulación. Se sembraron <i>Swieteniamacrophylla</i> (caoba) y <i>Tabebuia rosea</i> (macuilís) en combinación con vermicomposta de guano de murciélago, compostas de cachaza y de estiércol de borrego, con tres dosis diferentes de 6, 9 y 12 Mg ha ⁻¹ (millones de gramos), los cuales al mezclarse provocaron un mayor impacto en la degradación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP). La concentración inicial de HTP fue de 158,674 mg/kg. El experimento tuvo una duración de un año.	El pH del suelo contaminado inicial fue de 5.9 y aumentó hasta 6.2. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) varió entre 27 y 30.2 c mol kg ⁻¹ . La cachaza obtuvo el valor más bajo de nitrógeno (N) 0.79% ± 0.01 y el guano de murciélago el más alto de fósforo (P) de 5.32 ± 0.14 mg/kg. Con la siembra de macuilís más estiércol de borrego, se degradaron 84% y 85% de HTP. Con caoba más estiércol de borrego se degradó el 80% de HTP.
(Martínez et al.,2011)	Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes.	Biorremediación aerobia con lodos residuales a escala piloto y en laboratorio El suelo provenía del Grupo Goldcorp México, en el estado de Durango. Al experimento se añadieron 706 g de lodos frescos, y 23.334 kg de suelo, ambos divididos en dos etapas y agregados como fuente alternativa de nutrientes con una relación de C:N de 10:1. Los hidrocarburos fueron diésel, aceite y grasas. El primer lote contenía 51,191 ± 2,746 mg HTP kg ⁻¹ suelo (ppm), mientras que en el segundo fue de 1,752 ± 46 mg HTP kg ⁻¹ suelo. Cada 3 días por un periodo de 50 días se monitoreó pH, conductividad eléctrica (CE), contenido microbiano y concentración de HTP, el experimento tuvo una duración de 50 días.	El pH en la caracterización del suelo fue de 6.96 a nivel laboratorio y a escala piloto fue de 8.4 ± 0.044; la conductividad eléctrica fue medida en µs cm ⁻¹ de 516 ± 9 a nivel laboratorio y a escala piloto de 302.5 ± 16.37. Los valores de la capacidad de campo, y humedad a nivel laboratorio fueron de 14.83 ± 1.83% y 1.92 ± 0.29% y a escala piloto fueron de 12 ± 0.07% y 1.65 ± 0.17%. El proceso de biorremediación aerobia de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo, a nivel laboratorio y piloto, alcanzó tasas de remoción del 66% al 93% de HTP.
(Manilla et al.,2004)	Evaluación del funcionamiento de un tambor rotatorio aplicado a la biorremediación de un suelo contaminado con hidrocarburos.	Bioestimulación de la flora microbiana autóctona. El suelo remediado proviene de una fosa de tratamiento de aceite crudo, localizada en Veracruz, México. El tratamiento consistió en airear y mezclar, dentro de un tambor rotatorio, 715 g de lodo previamente preparado con suelo contaminado con aceite. Los tambores rotatorios se operaron a 8 y 15 rpm. El lodo contenía 50,000 mg de HTP /kg El tratamiento tuvo una duración de 15 días.	El suelo presentó las siguientes características: 36.5% arena, 62.4% limo, 0.99% arcilla y un 15.7% de materia orgánica. El proceso se realizó a temperatura ambiente, humedad constante y sin control de pH. Fueron extraídas cada 3 días muestras de 10 g de lodo para análisis de hidrocarburos totales. La relación C:N=100:5 Se obtuvo una degradación de HTP máximo del 65% a 10 rpm, considerando las características del suelo estudiado (35% de asfáltenos). Se obtuvo un incremento en los porcentajes de remoción del 50% (20,000 ppm más) al operar el reactor a 15 rpm.

Tabla 1.1 Casos de estudio de restauración de suelos con hidrocarburos, continuación.

Referencia	Título	Tipo de estudio	Resultados
(Alegría <i>et al.</i> , 2015)	Restauración de un suelo contaminado con hidrocarburos por un tren de tratamiento químico biológico.	<p>Lavado con tensoactivo Lauril Sulfato de Amonio.</p> <p>El suelo remediado proviene de un sitio contaminado en una zona industrial de Puebla, México, resultado de una fuga de combustóleo. Para preparar un lote de suelo, fue pretratado mediante 6 lavados con una solución al 0.5% de Lauril sulfato de amonio, con una relación 3:1 v/v de agua:suelo, con agitación suave por 8 h a 20 °C, en dos situaciones, con esterilización y sin ella.</p> <p>La bioaumentación se realizó por triplicado con inoculación de hongo <i>Aspergillus spp</i></p> <p>El suelo presentaba una concentración de hidrocarburos (combustóleo) de fracción pesada de 54,145 ± 1,288 ppm</p> <p>El tratamiento tuvo una duración de 60 días.</p>	<p>Del suelo inicial se obtuvieron los siguientes valores, pH 6.8 ± 0.33 unidades, humedad 21.68 % ± 0.2, conductividad eléctrica (dS/cm) 1.29 ± 0.05, materia orgánica 11.92 % ± 0.91, densidad aparente (g/cm³) 0.81 ± 0.09; del suelo final los valores fueron los siguientes pH 7.1 ± 0.2 unidades, humedad 33.21 % ± 1.2, conductividad eléctrica (dS/cm) 0.48 ± 0.03, materia orgánica 8.5 % ± 0.32, densidad aparente (g/cm³) 1.09 ± 0.11.</p> <p>Se obtuvo una remoción final de HTP de 88.44% para el suelo sin esterilizar y 87.86% para el suelo esterilizado con el hongo <i>Aspergillus spp</i> que presentó un buen crecimiento.</p>
(Torres <i>et al.</i> , 2007)	Combinación de gomas naturales y tensoactivos sintéticos para el lavado de un suelo altamente contaminado con crudo.	<p>Lavado con tensoactivos.</p> <p>Suelo obtenido de antigua refinería ubicada en Campeche, México.</p> <p>Suelo contaminado con crudo que contenía etil benceno y xileno (BTEX), hidrocarburos poli aromáticos (PAH's), contenidos metálicos, fracciones de diésel y gasolina, incluidas altas cantidades de 9,834 mg Ca + Mg /kg.</p> <p>El suelo se almacenó a 4°C durante tres meses para alcanzar el equilibrio.</p> <p>Se colocaron 6g de suelo contaminado en frascos de 40 mL, y se añadieron 20 mL de agua para el proceso de lavado con tensoactivos.</p> <p>El suelo presentaba una concentración de 92,080 mg de HTP / kg</p> <p>El tratamiento duró 3 meses.</p>	<p>El pH del suelo contaminado fue de 7.4, y una porosidad de 0.37, la densidad aparente final fue de 1.8 g/cm³, el pH no cambió durante el proceso. La concentración de tensoactivos evaluada fue de 0.125, 0.25, 0.5 y 1 % m/v.</p> <p>Para el tensoactivo dodecilsulfato sódico (SDS), las remociones de HTP fueron 29.2–36.29% (para concentraciones de 0.1 y 0.5% w/v del tensoactivo)</p> <p>Para la goma guar, los valores de eliminación de HTP estuvieron entre 39.1 – 49.6% (para soluciones de surfactante de 0.25 y 0.5% w/v).</p> <p>Finalmente, para la goma guar y algarrobo la eficiencia de HTP removidos estaban en el rango de 31.9 – 47.7%</p>

1.2 Justificación

Por su lenta velocidad de formación y capacidad de regeneración, el suelo es un recurso no renovable y las consecuencias de su degradación son: la reducción de servicios de soporte de suelo, de provisión o abastecimiento, de regulación y servicios culturales, el cambio climático, e incluso, la inseguridad alimentaria y nutricional. Por estas razones, restaurarlo es de vital importancia. Existen diferentes técnicas para que el suelo alcance los límites normativos, un ejemplo es el lavado que después permite utilizar medidas biocorrectivas. Asimismo, la biorrestauración puede ser complementaria y demuestra una efectividad probada en la reducción de Hidrocarburos totales de petróleo (HTP).

En este proyecto se determinaron las características fisicoquímicas de un suelo contaminado con combustóleo y la concentración de hidrocarburos totales, para realizar el tren de tratamiento y alcanzarla restauración de éste hasta lograr los límites normativos de la NOM-138, garantizando la recuperación del suelo con la realización de pruebas fitotóxicas. Se evaluó la eficiencia del tren de tratamiento, donde la primera etapa fue la implementación de la tecnología de lavado con el tensoactivo Tween 80, la segunda, un composteo intensivo a nivel laboratorio donde se utilizó sargazo como sustrato; si el suelo llega a límites normativos se realizaran pruebas de fitotoxicidad, si no, se seguiría dando tratamiento secuencial involucrando la fitorrestauración con pasto como técnica de pulimiento hasta lograrlo (lavado-compostaje-fitorrestauración).

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar un tren de tratamiento lavado-composteo-fitorrestauración en un suelo contaminado con combustóleo hasta límites normativos

2.2 Objetivos específicos

Evaluar las características fisicoquímicas del suelo para definir las tecnologías de restauración

Evaluar la eficiencia de remoción de HTP con la tecnología de lavado de suelo contaminado con el tensoactivo Tween 80

Definir los parámetros para llevar a cabo el composteo intensivo del suelo después del lavado, utilizando sargazo como co - sustrato

Implementar la fitorrestauración como técnica de pulimento hasta lograr límites normativos

Evaluar la eficiencia del tren de tratamiento propuesto, lavado de suelo-composteo con sargazo - fitorrestauración

3 Marco teórico

Este apartado contiene los temas principales que dan sustento al presente proyecto, como la contaminación de suelos con hidrocarburos, las tecnologías de restauración de suelos, lavado de suelos, composteo, la normatividad en materia del suelo y algunos casos de restauración de suelos con hidrocarburos.

3.1 Contaminación de suelos con hidrocarburos

La definición de suelo puede tener ligeras modificaciones según el área de estudio. Los lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación de éste, dicen que el suelo es un: “Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad” (SEMARNAT, 2012).

En el área ambiental cobran mayor importancia las definiciones que involucran al suelo en los procesos ecosistémicos, éstos se refieren a la regulación y distribución del flujo de agua o como un paliativo a los efectos de los contaminantes.

Para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (por sus siglas en inglés FAO) el suelo es un recurso finito, lo que hace imposible la recuperación y detención de la degradación de éste en el transcurso de la vida humana (FAO, 2018).

Cuando las características originales del suelo han sido alteradas por componentes peligrosos que a ciertas concentraciones se convierten en tóxicos de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, se dice que el suelo está contaminado.

Dicha norma define al suelo contaminado con hidrocarburos como aquel en el cual se encuentran presentes los hidrocarburos tales como: petróleo crudo, combustóleo, parafinas, petrolatos, aceites derivados de petróleo, gasóleo, diésel, turbosina, queroseno, creosota, gasavión, gasolvente, gasolinas, gas nafta y mezclas de productos desconocidos derivados del petróleo, en una concentración mayor a los límites máximos permisibles para la fracción ligera, media y pesada (SEMARNAT, 2012).

Para la FAO (2018), un suelo contaminado es aquel que se refiere a la presencia de un compuesto químico en el suelo o una sustancia fuera de sitio y/o presente en una concentración más alta de lo normal que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo.

La contaminación del suelo se ha convertido en una problemática debido a que las características químicas, físicas o biológicas del mismo fueron alteradas de manera negativa por derrames, ordeña clandestina y mala *praxis* en la extracción y perforación de pozos petroleros, lo que puede causar efectos nocivos en la flora y fauna, en la fertilidad de los suelos, el crecimiento de las plantas, así como en los animales que se alimentan de éstas (Infante, 1998).

Los suelos contaminados son alterados en sus características fisicoquímicas y biológicas, con lo que afectan el ámbito social y ambiental. En los últimos 20 años las pérdidas por contaminación de suelo se han llegado a valorar en un promedio de 50 mil millones de dólares, en donde el impacto ha sido en su mayoría en el aspecto ambiental y agrícola (Navarro, 2009).

México cuenta con un Inventario Nacional de Sitios Contaminados (INSC) que funge como una relación detallada, ordenada y valorada de sitios contaminados en el país en un momento determinado (INSC, 2018).

El “Sistema Informático de Sitios Contaminados” (SISCO), predecesor del INSC, realizó el levantamiento de información de campo en todas las entidades federativas, obteniendo información sobre los sitios potencialmente contaminados o contaminados con materiales o residuos peligrosos (INSC, 2018).

En el año 2007, existían 328 sitios contaminados con residuos peligrosos, al 2016 se contabilizaron 628 por lo que se presentó un aumento del 190 % en los sitios contaminados registrados en el país en ese periodo (SEMARNAT, 2017).

El total de sitios contaminados por hidrocarburos en el periodo 2015-2018 fue de 101 casos. Los contaminantes implicados en la contaminación del suelo fueron: la gasolina con 13 emergencias (12.87% del total), le sigue el diésel con 20 (19.8%), las turbosinas con 4 emergencias (3.96% del total), el asfalto con 5 casos (4.95% del total), el combustóleo con 4 (3.96%), el petróleo crudo con 6 emergencias (5.94% del total), mezclas de hidrocarburos/otros hidrocarburos con 13 emergencias (12.87% del total), los ácidos y bases con 14 casos (13.86% del total), la turbosina con 36 (5.7%), metales pesados con 2 casos (1.98% del total) y otros contaminantes con 4 emergencias (3.96% del total) (SEMARNAT, 2019).

3.1.1 Contexto histórico de los hidrocarburos en México

Los hidrocarburos fósiles están formados casi en su totalidad por compuestos orgánicos complejos de carbono e hidrógeno, en cantidades distintas entre sí junto con otros elementos químicos (Silos, 2008).

Los hidrocarburos se originan debido a la degradación aerobia y anaerobia de la materia orgánica, en condiciones de presión y temperatura específicas, reacciones que desprenden el oxígeno, nitrógeno y azufre que forman parte de los compuestos volátiles. Estas degradaciones dan paso al queroseno, que se transforma en los denominados hidrocarburos naturales dentro de las rocas arcillosas que lo contienen (roca madre), para ser extraídos deben migrar a rocas porosas y permeables, como las areniscas y dolomitas, quedando atrapados en ellas por algún mecanismo que impida su salida a la superficie, pues si esto ocurre se oxidan y volatilizan perdiendo todo interés como fuente de energía (Silos, 2008).

La explotación de los hidrocarburos fósiles en México se inició en el año 1904 en la faja de Oro en la Huasteca veracruzana, con el descubrimiento del primer yacimiento productor. Así comenzó una actividad que se ha mantenido hasta el día de hoy y que se convirtió en el eje central en la vida política, económica y social del país. En el 2019, la explotación petrolera suponía alrededor del 17.5% de los ingresos públicos (SHCP, 2019).

Se puede rastrear de manera fehaciente la evolución de la explotación de los hidrocarburos en México desde el periodo conocido como “el Porfiriato” que estableció que los recursos del subsuelo, (hidrocarburos) pertenecían al propietario del terreno superficial. Esto implicaba que los recursos fueran explotados por empresas privadas extranjeras. En 1917, la nueva Constitución otorgó el dominio directo a la Nación sobre todos los recursos naturales del subsuelo (Jimenez, 2008).

En 1938, el presidente Lázaro Cárdenas, decretó la expropiación de los bienes de las empresas petroleras privadas en favor de la Nación, con ello, se llevó a la creación de Petróleos Mexicanos (PEMEX) fungiendo como la única entidad del estado encargada de la explotación de los hidrocarburos en el país (Monreal, 2008).

En el año 2013, se publicó una reforma que planteó la modificación de los artículos 27 y 28 constitucionales, buscando eliminar la exclusividad del sector público en el manejo de los hidrocarburos como la gasolina, que se obtiene mediante destilación fraccionada, esta composición de hidrocarburos es utilizada como combustible para

motores de combustión interna, entre otras aplicaciones. El diésel, por su parte, es un hidrocarburo líquido y utilizado principalmente como combustible en calefacción, el combustóleo es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada, es el combustible más pesado de los que se pueden destilar a presión atmosférica, es utilizado como combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos, también se trata en procesos a menor presión para poder ser destilado y obtener las fracciones más pesadas del petróleo, como los aceites lubricantes y el asfalto. Es debido al alto potencial comercial que la iniciativa privada deseaba mayor participación en el sector y se vio beneficiada con la modificación de estos artículos, ya que se elimina la prohibición de realizar contratos de riesgos (SRE, 2014).

3.1.2 Producción de hidrocarburos en México

México se situó en el año 2017, en el puesto número 17 a nivel mundial en reservas probadas de petróleo, esto se traduce en 5,682 pozos activos, para los cuales existen 193 plataformas marinas, las cuales son utilizadas para la extracción de petróleo. Estas plataformas son equipadas con brocas para perforar el subsuelo hasta llegar al yacimiento. La actividad extractiva se lleva a cabo en la mayoría del territorio, aunque, hay estados que registran mayor actividad petrolera (INEGI, 2017).

Las reservas probadas de petróleo crudo equivalente son de un total de 25,466.8 millones de barriles (mmb), de este volumen 8,483.7 mmb se encuentran en la categoría probada, 7,678.3 mmb en la categoría probable y 9,304.8 mmb en la categoría posible (CNH, 2019).

PEMEX, adicionalmente a la producción de petróleo, realiza actividades de refinación y petroquímica. Actualmente, PEMEX opera seis refinerías y quince plantas de gas. En total, en el año 2019 se produjeron 1.67 millones de barriles de crudo diarios, contra 1.81 millones reportados en 2018, (gasolinas y diésel) (PEMEX, 2020).

En la Figura 3.1 se observa la relación de los valores de reservas de crudo probadas, la cuenca del Sureste representa un 84%, la cuenca Tampico-Misantlael 10.6% mientras que la cuenca de Burgos y Veracruz el 4.5% cada una, por su parte, la cuenca del Golfo de México Profundo abarca apenas el 0.7% y de manera marginal, la cuenca de Sabinas alrededor del 0.1% (CNH, 2019).



Figura 3.1 Mapa de distribución de reservas por cuenca (CNH, 2019)

3.2 Legislación en materia del suelo

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) tiene como propósito garantizar el derecho de toda persona a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar. Cuando se habla de medio ambiente desde el punto de vista jurídico, se refiere al ecosistema, que no significa sólo factores físicos, sino que en el mismo se hace referencia a las relaciones individuales, comunidades y sociales.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones tramitadas por las dependencias competentes, tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando éstos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana; asimismo, existen aquellas relativas a terminología y las que se refieren a su cumplimiento y aplicación (Secretaría de Salud, 2015). A continuación, se citan las normas aplicables al suelo, considerando incluso la relacionada a la composta, dado que algunos suelos son enriquecidos con la misma.

- NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el distrito federal. La Tabla 3.1 indica los valores máximos permisibles para

especificaciones microbiológicas, y la Tabla 3.2 las concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg en base seca (SEDEMA, 2012).

Tabla 3.1 Valores máximos permisibles para especificaciones microbiológicas

Microorganismos	Tolerancia
Coliformes fecales	<1000 NMP/g (en base seca)
Salmonella	<3 NMP en 4 g (en base seca)
Huevos de helmintos viables	1 en 4 g (en base seca)

Tabla 3.2 Concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg en base seca en compostas

Nivel – tipo*	As	Cd	Cr total	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Nivel 1 – tipo A	0.1	0.7	70	70	0.4	25	45	200
Nivel 2 – tipo B	0.7	1	70	150	0.7	60	120	500
Nivel 3 – tipo C	2.0	3	250	400-500	3	100	200	1200-1800

Tipo*

A-Uso recomendado en sustrato en viveros y sustituto de tierra para maceta

B-Agricultura ecológica y reforestación

C-Paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación

- NOM-021-SEMARNAT-2000, establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreos y análisis. En esta norma se encuentran las principales determinaciones analíticas para evaluaciones de salinidad como: pH, humedad del suelo, obtención del extracto de saturación, porcentaje de saturación entre otros, las principales determinaciones analíticas para evaluaciones y clasificación de suelos como: humedad del suelo, curva de retención de humedad, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables entre otros (SEMARNAT, 2002).
- NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, establece límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. La Tabla 3.3 establece los hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante los límites máximos permisibles en el tipo de suelo, mientras que la Tabla 3.4 establece los límites permisibles en el tipo de suelo (SEMARNAT, 2013).

Tabla 3.3 Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante

Productos contaminantes	Hidrocarburos				
	Fracción pesada	Fracción media	HAP	Fracción ligera	BTEX
Mezcla de productos desconocidos derivados del petróleo	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	x
Combustóleo	X		X		
Parafinas	X		X		
Petrolatos	X		X		
Aceites derivados del petróleo	X		X		
Gasóleo		X			
Diésel		X	X		
Turbosinas		X	X		
Queroseno		X	X		
Creosota		X	X		
Gasavión			X	X	X
Gasolvente				X	X
Gasolina				X	X
Gas nafta				X	X

Tabla 3.4 Límites máximos permisibles en tipo de suelo

Fracción de Hidrocarburos	Uso de suelo predominante (mg/kg, base seca)			Método Analítico
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial	
Ligera	200	200	500	NMX-AA-105-SCFI-2008
Media	1,200	1,200	5,000	NMX-AA-145-SCFI-2008
Pesada	3,000	3,000	6,000	NMX-AA-134-SCFI-2006

- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. La Tabla 3.5 muestra los límites máximos permisibles en tipo de suelo (SEMARNAT, 2005).

Tabla 3.5 Límites máximos permisibles en tipo de suelo

Contaminante	Uso/agrícola/residencial/comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Bario	5,400	67,000
Berilio	150	1,900
Cadmio	37	450
Cromo hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1,600	20,000
Plata	390	5,100
Plomo	400	800
Selenio	390	5,100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1,000

NOTA:

- En caso de que se presenten diversos usos del suelo en un sitio, debe considerarse el uso que predomine.
- Cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no estén establecidos los usos del suelo, se usará el valor residencial.

- Guía OCDE 208, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE): “Prueba de ecotoxicidad con plantas terrestres: pruebas de germinación y de crecimiento de plántulas”.

La finalidad de esta prueba es evaluar las secuelas sobre la germinación de las plántulas y el crecimiento inicial de las mismas después de haber sido expuestas a la sustancia contaminante de prueba incorporada al suelo, en el caso de este proyecto, sería el mismo suelo contaminado.

Para llevar a cabo la evaluación de germinación de las semillas, éstas se colocan en contacto con el suelo tratado o la sustancia de prueba, por el método de incorporación a la tierra o aplicación sobre la superficie, y se evalúan los efectos entre 14 y 21 días después de que se haya producido la germinación del 50% de las plántulas en el grupo de control, no expuesto al producto sometido a evaluación. Los criterios de evaluación son la observación visual de la germinación de las plántulas, las mediciones de biomasa (seca o húmeda) de las plantas, la altura de los brotes y los efectos perjudiciales visibles en diferentes partes de la planta.

La guía indica que las especies de plantas seleccionadas, para la prueba deben corresponder a diferentes familias de plantas para considerar la diversidad taxonómica en el reino vegetal y obtener resultados fiables y reproducibles. En la elección de las especies se debe tener en cuenta la diversidad taxonómica en el mundo vegetal, su distribución, la abundancia de características específicas del ciclo de vida de las especies y la existencia natural regional. Entre las especies de cultivo pueden considerarse como habituales: tomate, pepino, lechuga, soja, repollo, zanahoria, maíz, avena, cebolla o forraje. La lista de especies sugeridas para la prueba está en los anexos de la guía (OCDE, 2006).

Las condiciones ambientales para el desarrollo de esta prueba son (OCDE, 2006):

- Temperatura $22^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$
- Humedad: $70\% \pm 25\%$
- Fotoperiodo mínimo 16 horas de luz
- Intensidad de luz $350 \pm 50 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Puede ser necesaria una iluminación adicional si la intensidad disminuye por debajo de $200 \mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, longitudes de onda 400-700 nm.

3.3 Tecnologías de restauración de suelos

La restauración de un suelo contaminado es el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. En relación con el suelo, se entiende como el conjunto de acciones necesarias para recuperar y restablecer sus condiciones, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las tecnologías de restauración que resulte aplicable para la zona a remediar (DOF, 2002).

Una tecnología de tratamiento es cualquier operación o serie de operaciones unitarias que alteran la composición de una sustancia peligrosa, contaminante o contaminantes por medio de químicos, biológicos o físicos para reducir la toxicidad, la movilidad o el volumen de materiales contaminados siendo tratados (EPA, 2013). Para elegir la tecnología adecuada, es necesario considerar una serie de procesos y fenómenos fisicoquímicos y microbiológicos que ocurren en el suelo, además de ser útil para tomar acciones pertinentes en el mejoramiento de dichos procesos (Fernández *et al.*, 2006).

3.3.1 Tecnologías fisicoquímicas

Este tipo de tratamientos utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Estos tratamientos pueden realizarse en periodos cortos, el equipo es accesible y no se necesita de mucha energía, son efectivos en cuanto a costos (Volke y Velasco, 2002). A continuación, se mencionan algunas de estas tecnologías:

- Remediación electrocinética (RE): la remediación electrocinética separa y extrae contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico establecido por medio de electrodos que permite remover las especies cargadas (iones) (Van Cauwenberghe, 1997; Paillat *et al.*, 2000).
- Lavado de suelos: los contaminantes sorbidos en el suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas. De esta manera, se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo (Sellers, 1999; EPA, 2001). Mientras más finas sean las partículas de lavado menos eficiente es el lavado, esto quiere decir que, entre menos

permeabilidad, menos eficiencia de remoción, debido a que el contacto superficial está limitado.

- Inundación del suelo: se aplican grandes porciones de agua al suelo, en algunas ocasiones con algún aditivo o se inyectan en cuerpos de agua cercanos para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada; ayudando así al paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Sellers, 1999, EPA, 2001).
- Extracción: son técnicas típicamente aplicadas *in situ* que tienen como objetivo separar los contaminantes del suelo para su posterior tratamiento depurador, el modo de extracción depende del elemento a limpiar, estos pueden ser: extracción de aire, extracción de agua, extracción de fase libre, extracción de fases densas, extracción con disolventes y ácidos (Ortizet *al.*, 2007).
- Solidificación/Estabilización (S/E): es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que atrapan físicamente al contaminante formando un material sólido. La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica (Sellers, 1999; EPA, 2001).

3.3.2 Tecnologías biológicas

Se definen como tecnologías biológicas a todas ellas que utilizan bacterias, hongos y plantas para la recuperación de suelos contaminados; éstas buscan incrementar la actividad microbiana para descomponer o transformar el contaminante en estructuras menos complejas (agua, CO₂, metano, sales inorgánicas, biomasa) mejorando las condiciones de biodegradación a partir de la aireación, la adición de nutrientes, el control de pH, la humedad y la temperatura (Molina-Barahona *et al.*, 2004; Haritash y Kaushik 2009; Lorset *al.*, 2010; Luet *al.*, 2010). Se pueden clasificar como:

- Bioventeo: su objetivo es estimular la biodegradación natural de los compuestos orgánicos biodegradables semivolátiles (COS) o no volátiles en condiciones aerobias. Consiste en la ventilación forzada del suelo mediante la inyección de O₂,

con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores (Van Deuren *et al.*, 1997).

- Bioestimulación: implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, por medio de un sistema de pozos de inyección, los cuales se acondicionan en un reactor para inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo y del acuífero (Van Deuren *et al.*, 1997; Zitrides, 1990).
- Bioaumentación: esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos que tengan la capacidad para biodegradar el contaminante en cuestión o biotransformarlo (Riser-Roberts, 1998).
- Biolabranza: la superficie del suelo contaminado es tratado *in situ* por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, removiéndose periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados (Riser-Roberts, 1998).
- Fitorremediación: se define como una tecnología emergente que utiliza la vegetación para degradar, extraer, contener o inmovilizar contaminantes como materia orgánica, nutrientes o metales del suelo y el agua (EPA, 2000), es un método de fitoalmacenamiento en el que se eliminan los contaminantes inorgánicos y los metales pesados, debido a que, algunas plantas pueden acumular durante su fase de crecimiento altos niveles de tales sustancias en sus tejidos (Lasat, 2002; Schnoor, 1997); las aplicaciones de fitorremediación se pueden clasificar según el destino del contaminante: degradación, fitoextracción, rizofiltración, volatilización o una combinación de éstos.
- Fitoextracción: es una de las aplicaciones de la fitorremediación, se define como el proceso de plantar un cultivo de una especie que se sabe que acumula contaminantes en los brotes y hojas de las plantas y luego, cosechar o podar la especie vegetal y eliminar el contaminante del sitio. Esta técnica produce una masa de planta y contaminante (típicamente metales) que deben ser transportados para su eliminación o reciclaje (EPA, 2000).

- Biodegradación en la rizósfera: facilita la absorción de nutrimentos al aumentar el volumen de absorción de la raíz porque la población de microorganismos se ve aumentada por los exudados y mejora el establecimiento y desarrollo de las plantas en suelos contaminados con compuestos orgánicos (Gaspar *et al.*, 2002). La intensidad del crecimiento de las plantas y la capacidad para la degradación a través de la rizósfera dependen de la concentración y tipo del contaminante (Fernández, 2000), la especie vegetal, la edad, sus exudados, el tipo de suelos y sus propiedades (Chaíneau *et al.*, 2000). Yateem *et al.*, 2000, por ejemplo, investigaron la degradación de HTP en un suelo rizosférico de alfalfa (*Medicago sativa*), haba (*Vicia faba*) y pasto Ryegrass (*Lolium perenne*), aunque las plantas exhibieron un crecimiento normal con el 1% de hidrocarburos en el suelo; la degradación fue mayor en alfalfa y haba con el 36.6% y 35.6%, respectivamente, comparado con el 24% de la rizósfera de pasto.
- Composteo: es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables (Campitelliet *al.*, 2014). El material contaminado se mezcla con paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas, que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes. Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas (Alexander, 1994; Eweiset *al.*, 1998; Sempleet *al.*, 2001).
- Biorreactores: pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, es la tecnología más adecuada cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones ya que es posible controlar de manera eficiente procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación (Riser-Roberts, 1998); en términos generales, un biorreactor busca mantener ciertas condiciones ambientales propicias (pH, temperatura, concentración de oxígeno, etcétera) al organismo o sustancia química que se cultiva (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

3.3.3 Tecnologías térmicas

- Incineración: se trata de un tratamiento en el que los contaminantes son destruidos mediante el suministro de calor (Ross *et al.*, 2002) se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870°C a los 1,200°C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno (Van Deuren *et al.*, 1997).

- Desorción térmica (DT): los procesos de DT consisten en calentar (de 90°C a 540 °C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de provocar la evaporación (EPA, 2001).
- Vitrificación: el proceso de vitrificación utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1,600°C a 2,000°C; estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y mineraliza los orgánicos, se ha probado que el proceso también es aplicable para los compuestos orgánicos volátiles (COV) y para los compuestos orgánicos biodegradables semi volátiles (COS) (EPA, 2001).
- Pirolisis: se basa en la descomposición térmica de la materia orgánica o compuestos basados en carbono en concentraciones de oxígeno suficientemente bajas como para no producir combustión (Mancheno *et al.*, 2017). El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430°C (Riser-Roberts, 1998).

3.3.4 Tecnologías mixtas

- Extracción multifase: consiste en extraer simultáneamente, mediante zanjas o pozos, sustancias contaminantes que estén presentes en el suelo como compuestos orgánicos volátiles, fase líquida (en disolución) y especialmente, líquidos ligeros en fase no acuosa (LNAPL) (Ortiz *et al.*, 2007).
- Recuperación intrínseca: consiste en utilizar procesos naturales como la biodegradación aerobia, anaerobia y co-metabólica para contener la propagación de la contaminación, se aplica principalmente para tratar compuestos BTEX (benceno, tolueno, etil benceno y xileno) (Kirtland *et al.*, 2000; Kao, 2001) y más recientemente hidrocarburos clorados (Nobre y Nobre, 2004).

3.4 Lavado de suelos

El lavado del suelo es un método de remediación eficaz para la separación de hidrocarburos de petróleo, consiste en hacer circular una disolución que hará que los contaminantes sean desorbidos y arrastrados, esta tecnología es muy usada debido a su rapidez de remoción frente a otros métodos (Gang *et al.*, 2016).

Las disoluciones de lavado dependen de los contaminantes que se hallen en el suelo, pero generalmente se usan las siguientes:

- Únicamente agua, para tratar contaminantes que se disuelven fácilmente en el agua. Regularmente compuestos inorgánicos
- Agua con ácidos, para extraer metales y contaminantes orgánicos, como los que se encuentran generalmente en el reciclaje de baterías o en procesos de cromado industrial
- Agua con agentes tensoactivos (detergentes), para retirar contaminantes oleosos.

La eficacia de esta técnica depende del grado de adsorción del contaminante, controlado por una serie de propiedades del suelo como el pH, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, la mineralogía o el contenido en materia orgánica y otros factores como la antigüedad de la contaminación o la presencia de otros elementos tóxicos (Reed *et al.*, 1996).

3.4.1 Lavado de suelo

Lavado *in situ*

El lavado de suelo *in situ* se realiza utilizando un sistema de rociadores o pozos de inyección de agua limpia (Fernández, 1996), en donde el líquido inyectado atraviesa su masa, éstos son arrastrados a los macro poros desde donde son bombeados a la superficie, (como se aprecia en la Figura 3.2) es así como se disuelven los contaminantes. La instalación debe incluir además un sistema de pozos de extracción del agua de lavado, con sus correspondientes bombes (Dorrnsoro *et al.*, 2008).

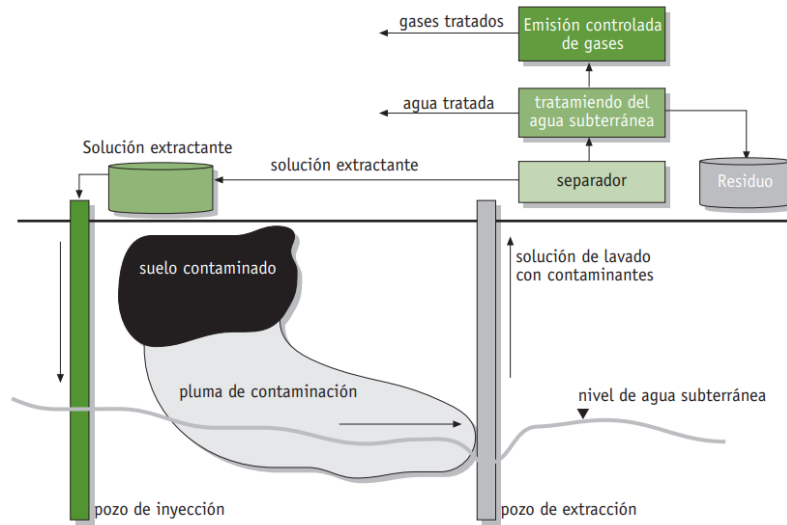


Figura 3.2 Tratamiento *in situ* de lavado de suelos (Mulligan *et al.*, 2001).

Lavado *ex situ*

Es una técnica similar a la *in situ*, la diferencia es que en este caso el suelo se excava y se lleva a una planta para su tratamiento, en donde la limpieza de éste es más completa y rápida.

El proceso de lavado es más energético (mezclado, agitación, tamizado y tratamiento selectivo) que en el tratamiento *in situ*. Los contaminantes orgánicos son fuertemente adsorbidos por las arcillas, por lo que resultan difíciles de eliminar. Para mezclas complejas de contaminantes se programan lavados secuenciales. Los líquidos resultantes son abundantes y deben de ser finalmente tratados (Dorransoro, 2008). En la Figura 3.3 se observa como se realiza el proceso de lavado de suelos contaminados de manera *ex situ*.

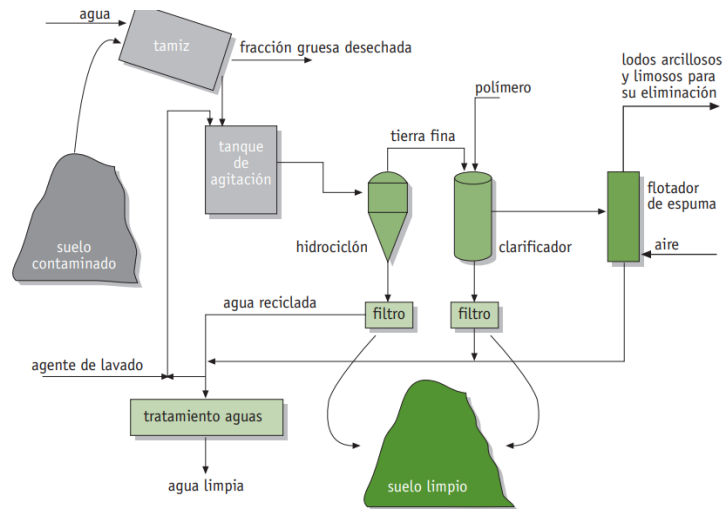


Figura 3.3 Proceso de lavado de suelos *ex situ* (Ortiz *et al.*, 2007).

3.4.2 Tipos de tensoactivos para el lavado de suelos

Los tensoactivos son moléculas anfífilas con una porción hidrofílica y otra hidrofóbica; se localizan preferentemente en la interfase de fluidos con diferentes grados de polaridad como son la de aceite-agua o aire-agua. Las propiedades de un tensoactivo son caracterizadas principalmente por cuatro parámetros: concentración micelar crítica (CMC), en un medio acuoso, cuando la concentración de tensoactivo supera un cierto valor crítico, las moléculas de monómero forman agregados organizados de un gran número de moléculas llamadas 'micelas', y esta concentración específica se llama concentración micelar crítica; número de agregación (n_a); balance hidrofílico-lipofílico (HLB); y punto de nube (PN). Estos parámetros indican el potencial del tensoactivo como agente emulsificante y de superficie, determinando su aplicación en diversas áreas, principalmente a nivel industrial y ambiental (Jimenez *et al.*, 2010).

Cuando las moléculas de surfactantes están presentes en un sistema heterogéneo agua-suelo, podrían adsorberse a la superficie las partículas del suelo y las interacciones tienen lugar (como se muestra en la Figura 3.4), normalmente, los grupos hidrofílicos son aptos para entrar en fase acuosa y los grupos lipofílicos tienden a combinarse con contaminantes hidrofóbicos o partículas del suelo (Xuhui *et al.*, 2015).

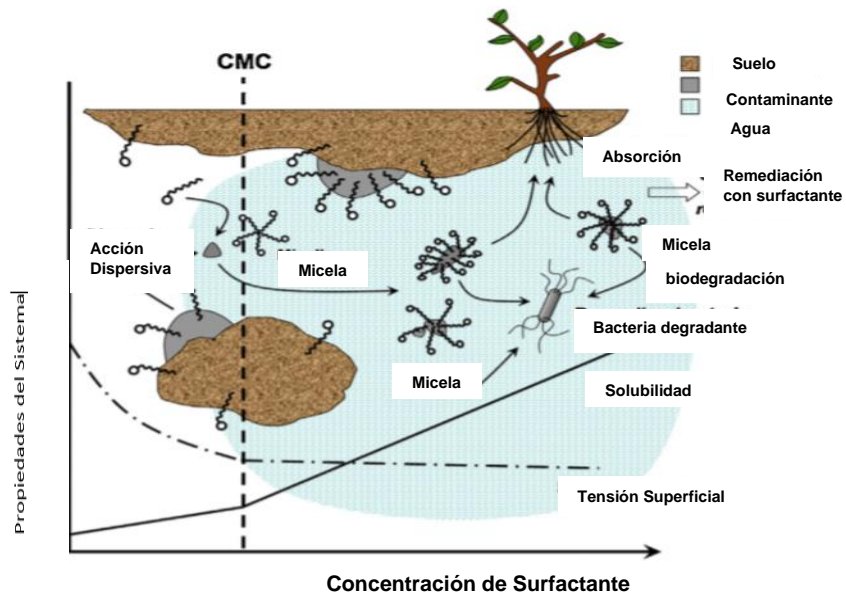


Figura 3.4 Esquema de remediation de suelos contaminados con tensoactivos (Xuhui *et al.*, 2015)

Los tensoactivos para el lavado del suelo deben tener buenos potenciales de solubilización, manteniendo al mismo tiempo una menor adsorción en el suelo. Los estudios muestran que el tipo de tensoactivos y la estructura molecular (por ejemplo, la longitud de la cadena hidrofóbica, número de grupos hidroxilos, y presencia de diferentes grupos sustitutivos) pueden en gran medida influenciar la relación de solubilización molar (MSR) de contaminantes. El MSR es definido como los moles de contaminante solubilizado por mol de surfactante (Xuhui *et al.*, 2015).

Tensoactivos aniónicos: son aquellos que en solución se ionizan, el grupo hidrófobo queda cargado negativamente, en las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran algunos ejemplos de éstos (Sanz, 2014), como los son el ácido perfluorooctanoico y el dodecil sulfato de sodio de cadena larga.

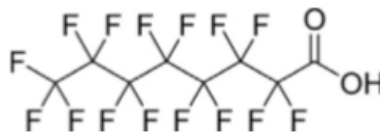


Figura 3.5 Ácido perfluorooctanoico (Xuhui *et al.*, 2015)

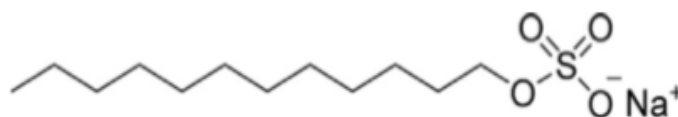


Figura 3.6 Dodecil sulfato de sodio (Xuhui *et al.*, 2015)

Tensoactivos catiónicos: son aquellos que en solución forman iones, resultando el grupo hidrófobo en la molécula cargada positivamente. Son compuestos de por lo menos una cadena de 8 a 25 átomos de carbono, derivada de ácidos grasos o de un derivado petroquímico y un nitrógeno cargado positivamente, como se muestra en la Figura 3.7 (Sanz, 2014).

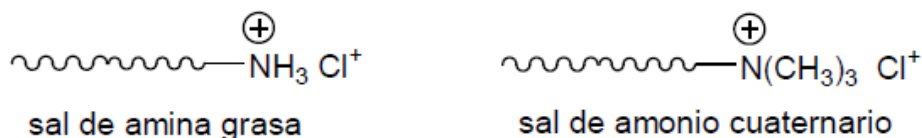


Figura 3.7 Ejemplos de tensoactivos catiónicos (Sanz, 2014)

Tensoactivos anfóteros: como su nombre lo indica, actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son aniónicos y en medio ácido son catiónicos. La carga eléctrica de la parte hidrofílica cambia en función del pH del medio. Poseen una carga positiva en ambientes fuertemente ácidos, y carga negativa en ambientes fuertemente básicos en la Figura 3.8 se observa un tensoactivo anfótero con las siguientes características, líquido, incoloro, de baja irritabilidad, para su uso en formulaciones de champú (Figura 3.8).

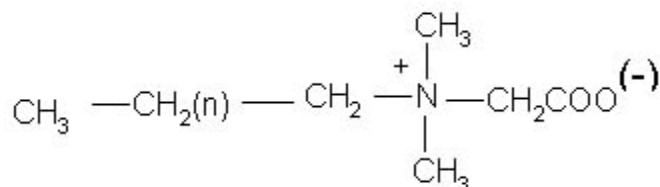


Figura 3.8 Tensoactivos anfóteros, Alquil Dimetil Betaína (Sanz, 2014)

Tensoactivos no-iónicos: estos tensoactivos no producen iones en solución acuosa y por este hecho son compatibles con cualquier otro tipo de tensoactivos, a menudo en muchas aplicaciones prácticas. Por otra parte, estos tensoactivos al no tener carga son menos sensibles a los electrolitos, especialmente a los cationes divalentes, que

los tensoactivos aniónicos y pueden, por lo tanto, ser utilizados en presencia de una salinidad alta. Los tensoactivos no iónicos son buenos detergentes, humectantes y emulsionantes, como por ejemplo, el tensoactivo Alquilfenol el cual es utilizado como herbicida y otras aplicaciones como en la fabricación de PVC y el poliestireno modificado con un alto potencial de contaminación ambiental (Figura 3.9) (Sanz, 2014).

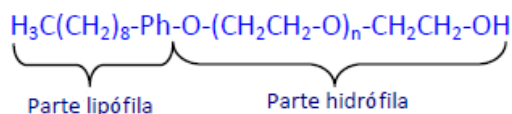


Figura 3.9 Alquilfenol, ejemplo de tensoactivo no-iónico (Sanz, 2014)

Biotensoactivos: los biotensoactivos son moléculas complejas producidas y secretadas por diferentes tipos de microorganismos, están integrados por estructuras diversas como péptidos, glicolípidos, glicopéptidos, ácidos grasos y fosfolípidos (Gautam y Tyagi, 2006).

Tween 80: entre los surfactantes sintéticos más utilizados se encuentra el polioxietileno-80-sorbitán monooleato (Tween 80), posee un ácido graso y una cadena de polioxietileno larga. Tiene una CMC muy baja, no afecta la actividad de la proteína y es efectivo en su solubilización. Es un líquido viscoso de color amarillo soluble en agua, su fórmula molecular es $\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$ y tiene una densidad de 1.08 g/cm^3 (Vinardell e Infante, 1999), se ha reconocido como un desaglomerante en procesos de síntesis química, físicos y biológicos, en la Figura 3.10 se muestra la estructura general del tensoactivo Tween 80 (Sung *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008).

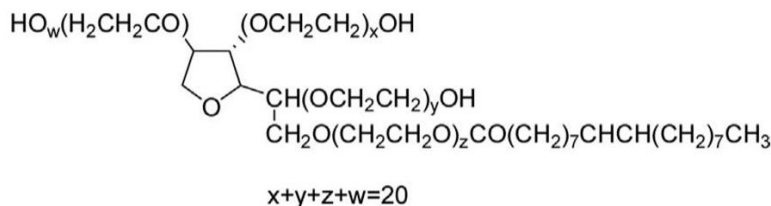


Figura 3.10 Estructura general del Tween 80 (Xuhui *et al.*, 2015)

3.5 Composteo

Este apartado contiene los temas principales para comprender que es un sistema de composteo, las etapas involucradas en el mismo, las aplicaciones y las características más importantes del sargazo (alga marina), que para este proyecto se aplicó como cosustrato.

3.5.1 Sistema de composteo

La NADF-020-AMBT-2011, define el composteo como: proceso de degradación bioquímica, de un sustrato orgánico, sólido y heterogéneo, en condiciones aerobias y durante el cual se presenta al menos una etapa termófila, dando como resultado una composta definida en la norma como un producto terminado del proceso de composteo (SEDEMA, 2012).

El campo de aplicación de la composta es en su mayoría la agricultura y jardinería para el control de la erosión y la recuperación de los suelos.

Para lograr la degradación de la materia que es viable a la descomposición, son esenciales las bacterias y otros microorganismos. También, desempeñan un importante papel los hongos, protozoos y actino bacterias (Casco y Bernat, 2008).

A nivel macroscópico, se encuentran las lombrices de tierra, hormigas, cochinillas, que consumen y degradan la materia orgánica.

El material orgánico que puede ser degradado por medios biológicos y puede transformarse en composta depende de diferentes tiempos de descomposición de éstos. Otros materiales deben evitarse, debido a la producción de malos olores y plagas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de materiales de descomposición rápida, lenta y muy lenta para el composteo (Casco y Bernat, 2008).

A) Materiales de rápida descomposición

- Restos de poda
- Estiércol
- Malezas jóvenes

B) Materiales de lenta descomposición

- Restos de frutas y verduras
- Restos de plantas

C) Materiales de muy lenta descomposición

- Ramas podadas
- Aserrín
- Cáscaras de frutos secos
- Huesos de frutos
- Periódicos
- Cartones, servilletas y envases de papel
- Grasas

3.5.2 Etapas de composteo

Existen diferentes modalidades que proporcionan el entorno apropiado para la descomposición de materia orgánica. La elección de una técnica u otra depende del volumen de residuos orgánicos a degradar, preferentemente en el periodo más corto posible y que genere un producto estable, con suficiente calidad como abono y libre de microorganismos patógenos (Ecoamérica, 2001).

Debido a que la degradación de la materia orgánica está sujeta a los ciclos biológicos de los microorganismos, se puede manipular la aireación y la humedad del composteo de forma que las diferencias entre los distintos sistemas de composteo suelen derivar de cómo se realice el control de estos parámetros (Ecoamérica, 2001).

Con base en esto, los sistemas de compostaje se pueden clasificar en dos tipos: abiertos (al aire libre) y cerrados (confinados en un recinto controlado), siendo este último el idóneo para controlar la aireación (Ecoamérica, 2001).

Sistemas abiertos

- **Pila móvil**

Este es el sistema más común y se lleva a cabo gracias a un volteo que puede ser manual o mecánico. Se acumula el material, se mezcla y voltea periódicamente,

evitando así la compactación y suministrando oxígeno al sistema. Los sistemas de pila móvil necesitan un gran espacio para mover la masa en el proceso de volteo (Román *et al.*, 2013). En este sistema la temperatura puede ser medida por termómetros de lanza, tomándose muestras en tres puntos equidistantes (Hoyos *et al.*, 2010).

Pila estática

En los métodos de pila estática se airea de manera forzada la materia orgánica. La pila se construye sobre una red de tuberías donde se inyecta aire a presión con el propósito de proporcionar el medio aeróbico adecuado para el proceso de compostaje (Herrera y Riffo, 2006). En esta técnica, como en la anterior se suele operar a temperaturas elevadas que permiten el desarrollo de las bacterias y así eliminar patógenos (Román *et al.*, 2013).

Los sistemas de pila estática carecen de homogeneización, por lo que se puede observar la formación de gradientes de temperatura y rutas de circulación del aire, produciéndose, además, la compactación paulatina del material durante la descomposición de éste con la consecuente pérdida de porosidad (Román *et al.*, 2013).

Sistemas cerrados

- **Sistemas dinámicos o estáticos**

Se forman pilas en un sistema cerrado (mínimo 1m³, máximo 1.5m³) con tapa, colocando una capa gruesa (aproximadamente 6 cm) de hojarasca y se deja inmóvil, se vierten ahí todos los desechos orgánicos y se cubren con otra capa de hojarasca, para que se mantenga la humedad se vierte agua que resulta indispensable y se espolvorea con cal para evitar malos olores. Termina ventilándose naturalmente por un proceso de convección térmica natural (Román *et al.*, 2013).

En este procedimiento no se tienen temperaturas establecidas, los procesos son los naturales a temperatura ambiente y los parámetros de automatización, como, por ejemplo, sondas de temperatura, sondas de medida del grado de humedad y sondas para medir la concentración de oxígeno, dióxido de carbono y amoníaco, permitiendo la inmovilidad del sistema (Román *et al.*, 2013).

En el composteo la temperatura de los residuos varía dependiendo de la actividad de los microorganismos. Este parámetro se puede dividir en cuatro etapas: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración (Román *et al.*, 2013).

- **Fase mesófila**

Los microorganismos mesófilos empiezan a desarrollarse utilizando fuentes sencillas de carbono y nitrógeno, con una temperatura comprendida entre 40-45°C. Se produce calor y CO₂, ocurre una disminución del pH a valores de alrededor de 5.5 debido a la descomposición de fuentes sencillas de carbono, como azúcares, produciendo ácidos orgánicos (Román *et al.*, 2013).

La relación Carbono/Nitrógeno debe ser la adecuada (entre 25/1 y 30/1) para garantizar las fuentes de energía y proteínas para los microorganismos mesófilos (Román *et al.*, 2013).

- **Fase termófila**

La temperatura sube por acción de la fermentación hasta alcanzar valores de 60 a 70°C, las bacterias termófilas actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina. Las bacterias y hongos termófilos degradan la celulosa y parcialmente la lignina, experimentando un aumento de temperatura y el nitrógeno se convierte en amoníaco por lo que el pH del medio sube (Román *et al.*, 2013).

A partir de los 60°C las bacterias que producen esporas y actino bacterias se hacen presentes, éstas descomponen las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de carbono complejos. Durante un periodo que puede variar desde múltiples días a algunos meses, dependiendo del material a descomponer, condiciones climáticas, entre otros (Román *et al.*, 2013).

Esta fase también recibe el nombre de fase de higienización ya que el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichacoli* y *Salmonella spp*, esta fase es importante pues las temperaturas por encima de los 55°C eliminan los quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida, dando lugar a un producto higienizado (Herrera y Riffo, 2006).

En esta etapa se deben realizar frecuentes volteos con el objeto de aportar oxígeno, el cual es rápidamente consumido por los microorganismos (Román *et al.*, 2013).

- **Fase de enfriamiento**

Esta etapa se da cuando la materia orgánica ha agotado las fuentes de carbono y nitrógeno fácilmente degradables, los microorganismos mesófilos actúan nuevamente en la degradación de celulosa y lignina debido a la disminución de la temperatura, 40-45°C. Esta fase se reconocerá cuando, después de voltear la pila no exista un aumento de temperatura posterior (Román *et al.*, 2013).

- **Fase de maduración**

Este periodo tarda meses a temperatura ambiente, el pH se estabiliza próximo a la neutralidad. También se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román *et al.*, 2013).

3.5.3 Aplicaciones de composteo

La composta tiene una doble función en la que puede servir como la remediación orgánica principalmente, y abono o fertilizante y sustrato de cultivo (SEMARNAT, 2003).

El suelo que se utiliza para cultivo se ve falto de materia orgánica, esto causa problemas como la erosión acelerada, deterioro de las propiedades físicas, fisicoquímicas, químicas y biológicas del suelo y en general, disminución de la fertilidad del suelo (SEMARNAT, 2003).

El uso de la composta se denomina enmienda húmica, que puede ser utilizada como mantenimiento, que consiste en reponer la cantidad de humus o materia orgánica si sólo sirve para aumentar la cantidad de humus existente. Los cultivos en los que la composta es aplicable pueden ser tan variados como: hortícolas, cítricos, viñedos, forestales y arrozales. La utilización de composta en dosis moderadas provoca tanto a nivel de campo como de invernadero, aumentos apreciables de los rendimientos de cosechas de diferentes cultivos, la dosis depende enteramente del suelo y la especie vegetal a utilizar quedando a considerar factores como el requerimiento de nutrientes del cultivo y el estado fisicoquímico del suelo (SEMARNAT, 2003).

Existen otros usos posibles de la composta como el paisajismo, en la restauración de suelos degradados, recuperación de superficies denostadas por diversas actividades como la construcción, minería, entre otros.

La composta también cuenta con la posibilidad de ser utilizada en las superficies forestales no naturales y en los planes de reforestación tanto de superficies quemadas, tierras de cultivo abandonadas, zonas dañadas por vertidos industriales entre otros (SEMARNAT, 2003).

3.5.4 Sargazo

El sargazo es un conjunto de algas marinas que pueden llegar a medir varios metros y se pueden diferenciar en formas rizoides, estipes y lámina. Las especies *Sargassumfluitans* y *Sargassumnatansson* organismos flotantes que cuentan con vesículas llenas de gas para mantenerse a flote y promover la fotosíntesis (CONACYT, 2019).

El sargazo es arrastrado por el viento y las corrientes marinas. Desde el año 2011, se ha observado un crecimiento masivo y sostenido de las poblaciones de estas especies en el Atlántico, se ha logrado estimar que han alcanzado una longitud de hasta 8,850 kilómetros en el año 2018, esta longitud, según estimaciones, se traduce a una biomasa aproximada de 20 millones de toneladas (CONACYT, 2019).

Las grandes masas que llegan a las costas mexicanas se han convertido en un problema ambiental, debido a que las capas de sargazo sobre el agua impiden el paso de luz y la descomposición de materia orgánica disminuye el oxígeno disuelto en el agua (CONACYT, 2019).

Para que México pueda hacer frente al arribo desmesurado de esta alga, es necesario encontrar un aprovechamiento sustentable incentivado en el desarrollo tecnológico. El sargazo podría ser utilizado para la producción de biogás, fertilizantes, sustrato para mejorar el suelo, alimentos, forrajes, materiales biodegradables, entre otros (CONACYT, 2019).

Esto puede ser logrado gracias a la biodegradación del alginato, principal componente estructural de su pared celular. En ambientes cercanos a la costa e incluso en zonas más profundas, la tasa de degradación está determinada por factores como la accesibilidad microbiana, condiciones de temperatura y pH. Como producto de la degradación biológica de las algas pardas se generan gases (H_2S , CO_2 , CH_4), sólidos volátiles (materia orgánica) y una alta demanda química de oxígeno (DQO) (Ardalan *et al.*, 2018).

Adicionalmente, diferentes compuestos disueltos pueden ser liberados de sus tejidos como el manitol, ácidos grasos volátiles, alcoholes y polifenoles. Las bacterias que

se involucran en estos procesos generalmente usan los productos para mantener su propio metabolismo (Forro, 1987) mientras que algunos otros nutrientes o iones liberados pueden provocar eutrofización. De igual forma, el proceso aeróbico que convierte la materia orgánica (carbohidratos, proteínas y lípidos) en CO_2 y H_2O a través de la hidrólisis bacteriana, ocurre a expensas del consumo de O_2 originando zonas anóxicas. Asimismo, el CH_4 , que deriva de la descomposición (principalmente del manitol y del alginato) también puede resultar perjudicial para el entorno (Ardalan *et al.*, 2018), o para el mismo proceso así también el H_2S , pero con un correcto composteo y una correcta aireación se controlan las emisiones de dichos gases.

3.6 Estudios de caso de restauración de suelos con hidrocarburos

En la Tabla 3.6 se presentan casos de restauración de suelos, en la cual se incluyen remediación de suelos contaminados con combustible, lavado de suelos con tensoactivos, degradación de hidrocarburos aromáticos y remediación de suelos con compost.

Tabla 3.6 Casos de restauración de suelos y resultados

Referencias	Título	Tipo de Estudio	Resultados
(Bernal, 2015)	Remediación de un suelo contaminado con diésel mediante la técnica de lavado <i>exsitu</i> empleando surfactantes a diferentes temperaturas	Lavado de suelo. Se contaminaron tres muestras de suelos a diferentes concentraciones de HTP's. Se realizaron tres lavados con diferentes tensoactivos, en diferentes concentraciones de éstos y diferentes concentraciones iniciales de HTP's. El primer lavado fue con el tensoactivo Alpha-step PC48 al 1% y al 2.5% a una temperatura de 40-45 °C durante 2 h. El segundo lavado con alquilaril sulfonato de sodio al 1% a una temperatura de 40-45°C durante 2 h. El tercer lavado se realizó con alquileter sulfato de sodio al 3% a una temperatura de 40-45°C durante 2 h.	Primer lavado: la concentración inicial (CI) de diésel de la primera muestra fue de 116,360 mg/kg base seca, se obtuvo al final una concentración (CF) de HTP's de 94,860 mg/kg base seca, esto quiere decir el 18.47% de remoción; utilizando el mismo tensoactivo, pero ahora al 2.5% y una CI de HTP's de 77,090 mg/kg se obtuvo una CF de 75,000 mg/kg siendo esto un 2.71% de remoción. Segundo lavado: CI de HTP's con 66,750 mg/kg de HTP's, reportaron una CF de 56,593.33 mg/kg con 15.21% de remoción Tercer lavado: CI de HTP's de 117,434 mg/kg de suelo seco y a la salida del lavado se obtuvo una CF de 54,413 mg/kg de suelo seco, siendo un 53.66%, siendo este el mejor surfactante para la remoción de los HTP's. El aumento de temperatura no incrementa la eficiencia del surfactante.
(Gang <i>et al.</i> , 2016)	La influencia de los minerales arcillosos y los tensoactivos en la eliminación de hidrocarburos durante el lavado de suelos contaminados con petróleo.	Lavado de suelo. Se prestó especial atención al efecto del tensoactivo en la eliminación de petróleo para los tipos de minerales de arcilla individuales. Se probaron cuatro minerales de arcilla (clorita, caolinita, montmorillonita, illita) y tres tipos de tensoactivos (el no iónico: 30 mg/L Tween20, 150 mg/L Triton X-100; el catión: 300 mg/L CTAB; el aniónico: 400 mg/L Dodec-MNS y 200 mg/L NPS-10). Para cada tensoactivo se utilizaron 100 g de la muestra de suelo.	Las concentraciones iniciales de petróleo en el suelo fueron, para la prueba #1= 15.21% peso, prueba #2= 14.72 % peso. Los resultados mostraron que el porcentaje de eliminación de petróleo más alta para una arcilla simple fue 13.2 ± 0.98% (clorito), 34.2 ± 1.52% (caolinita), 68.0 ± 2.84% (montmorillonita) y 86.3 ± 2.25% (illita). Montmorillonita e illita mostraron una eficiencia en el lavado de petróleo. La agitación mecánica en el reactor fue de 160 rpm por 30 min y 110 rpm por 20 min.
(Figueroa <i>et al.</i> , 2017)	Degradación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) de residuos de barrido de calles usando compost.	Compostaje. Se evaluó la degradación de HAP's provenientes de residuos de barrido de calles, se trabajó con dos muestras de compost con un pretratamiento anaerobio con una duración de 20 a 30 días. El tratamiento planteado en el experimento fue aeróbico a diferente grado de maduración. La degradación fue evaluada en mezclas al 75% de residuo, con compost a intervalos de 0, 28, 60, 90 y 120 días.	La concentración inicial de HAP's presentó un valor de 2.72 µg/g. Se logró una mayor remoción de entre 80% y 90% de HAP's en 120 días de tratamiento en compost esta situación puede deberse a que el material de compost de ambas muestras proviene de pretratamiento parcialmente anaeróbicos, y al someterse a un tratamiento aeróbico promueven los microorganismos los cuales degradan materia orgánica y forman sustancias húmicas.

Tabla 3.6 Casos de restauración de suelos y resultados, continuación.

Referencias	Título	Tipo de Estudio	Resultados
(Medina, <i>et al.</i> , 2014)	Remediación de un suelo contaminado con hidrocarburos mediante oxidación química y compost	Compostaje. La bioestimulación con compost maduro, y la oxidación química directa del suelo son estrategias que podrían favorecer la accesibilidad al HAP's (Hidrocarburos Aromáticos policíclicos), promoviendo su degradación. Con el fin de estudiar el efecto combinado de ambas estrategias, fueron preparados microcosmos de suelo contaminado con HAP's (270 ppm) para evaluar el efecto del agregado de compost (3g:7g); de la oxidación con persulfato de amonio y de la acción combinada de oxidación y posterior estimulación con compost.	El tratamiento oxidativo consistió en 3 aplicaciones del oxidante (3.33 g), con 24% de humedad a 30°C. Los microcosmos fueron incubados a 25°C durante 30 días. El suelo en estudio evidenció alta densidad de poblaciones bacterianas, pero no actividad deshidrogenasa. La estimulación con compost incrementó la actividad deshidrogenasa y redujo parcialmente la toxicidad del sistema. El tratamiento oxidativo redujo significativamente la concentración de HAP's y la densidad de poblaciones microbianas, aumentando la toxicidad. El posterior agregado de compost recuperó las poblaciones microbianas sin reducir los índices de toxicidad respecto del suelo original. La recuperación biológica, aunque parcial, dado que la actividad deshidrogenasa aumentó solo un 10% respecto de la bioestimulación, fue correspondida con un 70% de eliminación de HAP's en 30 días.
(Beltrán <i>et al.</i> , 2006)	Variación de la eficiencia de la biorrestauración con pastos, a diferentes profundidades de la rizosfera, para suelos contaminados con diésel.	Fitorrestauración Se sembraron semillas de pasto en suelo contaminado con aproximadamente 10,000 y 20,000 ppm (base seca) de diésel. Se analizaron muestras de suelo a tres profundidades (10-15 cm, 20-25 cm y 30-35 cm) durante cuatro meses.	Se observó que la degradación del diésel disminuye conforme aumentó la profundidad en el suelo. Las eficiencias en el suelo contaminado con 10,000 ppm de diésel, a las diferentes profundidades fueron 79.4%, 77% y 67.3% respectivamente y en el suelo con 20,000 ppm fueron de 77.4%, 66.2% y 36.6% respectivamente; en atenuación natural existió un 30% de degradación con porcentajes de volatilización entre 37% y 39%.
(Beltrán <i>et al.</i> , 2019)	Fitotoxicidad de un suelo restaurado por la tecnología de lavado con tensoactivos	Fitotoxicidad. Suelo contaminado con combustóleo previamente lavado con tensoactivos. Se utilizó el método EPA 3540 C de extracción soxhlet. Se emplearon cuatro surfactantes, dos sintéticos (dodecil sulfato de sodio (SDS) y Tween 80) y dos naturales (goma guar y goma de algarrobo) a una concentración 0.5% p/v. Se realizan las pruebas en un invernadero en rizotrones de vidrio por triplicado, sembrando 4 semillas de pepino <i>Cucurbiturita</i> por un tiempo de 14 a 21 días. Se realizaron un total de 15 lavados.	Características del suelo: pH: 6.31 ± 0.016 Espacio poroso: 79.83% Humedad a capacidad de campo: 11% Materia orgánica: 20.24% HTP: 138 084.63 ± 123.09 mg/kg fracción pesada. El porcentaje de remoción de HTP con los tensoactivos fueron los siguientes: SDS: 97.6%, goma de algarrobo: 97.15%, goma guar: 97.12% y Tween 80: 96.57%. Teniendo así, como mejores tratamientos: primero al SDS, después Goma de algarrobo, le sigue Goma guar y por último Tween 80. La mayor generación de biomasa se obtuvo con el suelo testigo sin contaminar seguido del suelo tratado con goma de algarrobo y el SDS con resultados similares.

4 Metodología

La experimentación se realizó en el Laboratorio del Área de Tecnologías Sustentables, ubicado en el edificio W planta baja de la UAM-A. El procedimiento experimental fue llevado a cabo en cada etapa como se muestra en la Figura 4.1

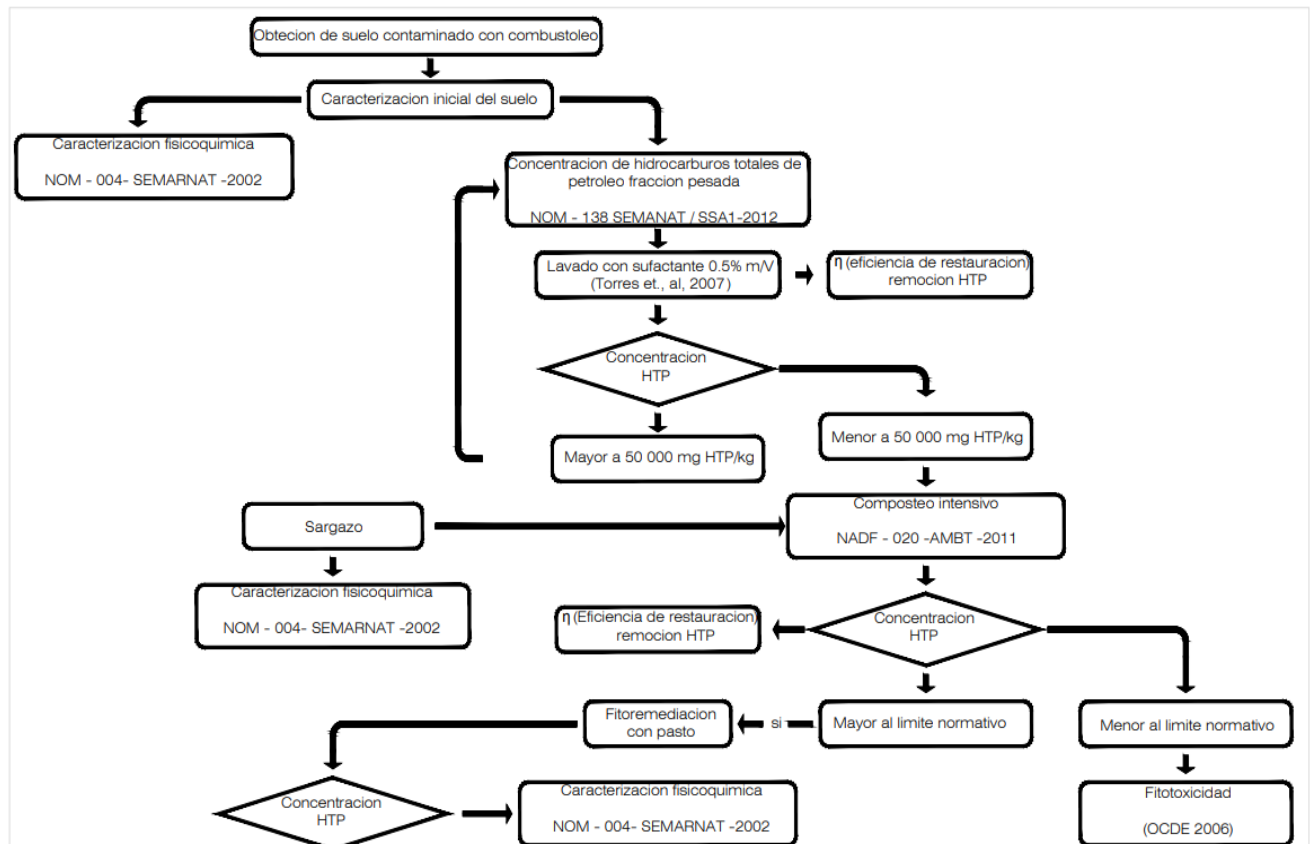


Figura 4.1 Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en la experimentación

4.1 Obtención del suelo

El suelo se encontraba contaminado con combustóleo debido a que se ignoraba que existía un depósito enterrado en un predio industrial, el cual con el tiempo sufrió fracturas, haciendo evidente la contaminación. En la Figura 4.2 se muestra una imagen del sitio de donde se obtuvo la muestra de suelo.



Figura 4.2 Depósito de combustóleo fracturado (Fotografía propia ATS)

4.2 Caracterización fisicoquímica del suelo

La caracterización se realizó según los parámetros mencionados en la NOM- 021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis (SEMARNAT, 2000). Ésta se realizó antes y después del proceso de restauración, en la Tabla 4.1 se muestran los parámetros analizados y los métodos por los que fueron evaluados.

Tabla 4.1 Caracterización del suelo antes y después de la restauración (SEMARNAT, 2000).

Parámetros	Método	Técnica
pH	AS-02 con potenciómetro	Se midió en la suspensión sobrenadante de una mezcla con una relación suelo agua 1:2
Color	AS-22 Tablas Munsell	Se determinó por comparación con las tablas de color Munsell, las cuales permiten unificar la denominación del color
Conductividad eléctrica	AS-18 con conductímetro	Se midió en la suspensión extraída del suelo a capacidad de campo
Textura del suelo	AS-09 de Bouyoucos	Por hidrómetro y el triángulo de texturas establecido por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos
Densidad aparente	AS-04 con parafina	La técnica es gravimétrica pesando una muestra (terron) y en el caso del volumen, éste es determinado de manera indirecta recubriendo el terrón con una capa de parafina y o sumergido en agua
Densidad real	AS-03 con picnómetro	Por el método del picnómetro, haciendo una medición indirecta de la densidad de un fluido desplazado por el peso de una muestra de suelo
Porosidad	Relación entre densidad real y densidad aparente	Se obtuvo con la relación de la densidad aparente y la densidad real
Humedad	AS-05 por gravimetría	Por un método gravimétrico, en el que se determina la cantidad de agua expresada en porcentaje, por una diferencia de peso entre la masa del suelo húmedo y la masa del suelo seco (secado en estufa a 105°C hasta peso constante)
Materia orgánica	AS-07 de Walkley y Black	Por medio de una reacción de oxidación con dicromato de potasio y se valora con sulfato ferroso
Nitrógeno	Kjeldahl	Por digestión con ácido sulfúrico concentrado a temperaturas entre 350 y 380°C
Relación C/N	Relación entre la determinación de materia orgánica y nitrógeno	Relación entre los valores

4.3 Lavado con tensoactivo Tween 80 (etapa 1)

El suelo contaminado con combustóleo se sometió a un proceso fisicoquímico de lavado, en donde se empleó un tensoactivo sintético llamado Tween 80 con una composición de 0.5 % w/v; en una relación 1:2, suelo - solución. A esta composición se han reportado remociones altas de los HTP (Torres *et al.*, 2007).

El suelo contaminado se pesó, obteniendo un resultado de 4.58 kg, para después resguardar 0.8 kg de éste para su caracterización inicial.

Los 3.8 kg restantes se sometieron a lavado por lotes, a los cuales se les agregó la solución 0.5 % w/v (5 g del tensoactivo para cada litro de agua), esto quiere decir que se preparó la solución con 20 mL de tensoactivo en 2L de agua. Se colocó una masa de 0.95 kg de suelo en cada frasco con una capacidad de 2L, se adicionó la solución de tensoactivo y se agitó por 24 h. La Figura 4.3 muestra uno de los frascos con el suelo y el tensoactivo. Al finalizar cada lavado, se decantó el agua de éste.

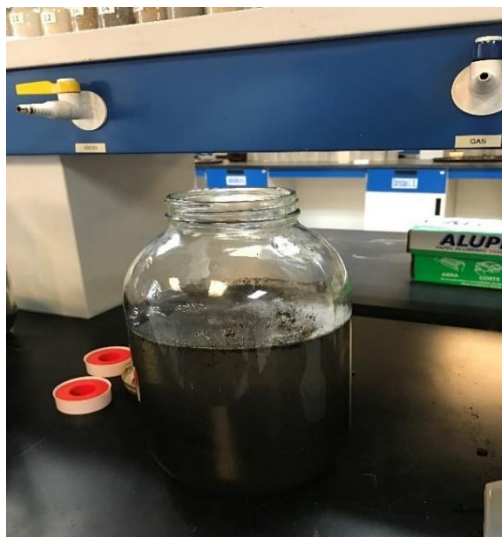


Figura 4.3 Frasco con suelo contaminado y disolución de tensoactivo Tween 80

El sobrenadante líquido se trató en la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales (PPTAR) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, en donde la solución se integró al tanque de coagulación - floculación para incorporarse a un tren de tratamiento.

En total se repitió el lavado de suelo dos veces y se verificó que la concentración de hidrocarburos disminuyera con las pruebas de determinación de HTP fracción pesada, descrita en la siguiente sección para poder seguir con el tren de tratamiento.

4.4 Concentración de hidrocarburos totales de petróleo, fracción pesada

La concentración de HTP fracción pesada en el suelo, se analizó mediante el método extracción Soxhlet (la Figura 4.4, muestra el equipo ensamblado para la prueba Soxhlet). Este método, se encuentra en el anexo A de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para la determinación de hidrocarburos de la fracción pesada, mientras que el procedimiento de prueba se describe en la NMX-AA-134-SCFI-2006 Suelos-Hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría. El método consiste en extraer los hidrocarburos contenidos en el suelo, mediante la acción de un solvente orgánico volátil (hexano), la destilación del solvente y la determinación gravimétrica de HTP.

En este método el componente de interés son las grasas, las cuales se disuelven en disolventes no polares, que en este caso fue el hexano.

Para llevar a cabo este método se colocó 1g de suelo seco en un cartucho de celulosa y se utilizaron 120 mL de hexano como solvente para su extracción, el tiempo que se dejó a reflujo fue de 4 h. Una vez realizada la extracción Soxhlet se obtuvo el extracto de combustóleo con hexano en matraces de fondo plano, el cual fue sometido a una destilación para su separación (Figura 4.5). Una vez separado el hexano, se transfirió el analito en cinco tubos de ensayo y se colocaron en la estufa hasta alcanzar una temperatura constante, el tiempo que pasaron éstos en la estufa fue de aproximadamente una hora y treinta minutos, después se colocaron en el desecador por treinta minutos para llegar a peso constante, para la volatilización final y la determinación gravimétrica del combustóleo.

El extracto que contiene el hidrocarburo se concentra evaporando el solvente, para determinar los HTP se utilizó la ecuación:

$$ppm \text{ HTP} = \frac{g \text{ de analito}}{g \text{ de muestra}} \times 10^6$$

Donde:

ppm HTP = expresa las partes por millón de hidrocarburos totales del petróleo presentes en la muestra

g analito = gramos de analito después de la destilación

g muestra = gramos de suelo en el cartucho



Figura 4.4 Ensamble del equipo para realizar la prueba Soxhlet para la extracción de los HTP

Para obtener la masa final de HTP, de la destilación se utilizó la ecuación:

$$\text{Masa final HTP (g)} = \text{peso del tubo volatilizado (g)} - \text{peso del tubo constante (g)}$$



Figura 4.5 Ensamble para destilar el hexano y separarlo del combustóleo

4.5 Determinación de nitrógeno

La determinación del contenido de nitrógeno se realizó mediante el método Kjeldahl, tal como lo indica la NOM- 021-SEMARNAT-2000. Se prepararon tres muestras por duplicado que contenían 2 g de la mezcla de sales para nitrógeno, sulfato de potasio y sulfato de cobre, se mezcló con 5 mL de ácido sulfúrico concentrado a temperaturas entre 350 y 380°C, las muestras se dejaron 24 h. Cuánto más alta sea la temperatura, más rápido será el proceso de digestión, la Figura 4.6, muestra el equipo ensamblado para la prueba Kjeldahl.

Se trabajó con dos blancos de reactivo sin suelo, dos con 1 g suelo sin lavar con el tensoactivo Tween 80 y por último dos matraces a los que se les denominó suelo lavado con el tensoactivo Tween 80, todos contenían la mezcla de sales y el ácido sulfúrico. Lo anterior con el fin de establecer la relación C/N para la etapa de composteo siguiente.



Figura 4.6 Equipo ensamblado para la prueba Kjeldahl

La destilación rápida se realizó tal como lo indica la NOM- 021-SEMARNAT-2000, para ésta se filtró una mezcla de catalizadores los cuales fueron sulfato de potasio (K_2SO_4) y sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), más 1 g de muestra del suelo lavado, más ácido sulfúrico (H_2SO_4), y se utilizaron 6 frascos con 10 mL de ácido bórico (H_3BO_3), después de agregar éste, se vertió óxido de sodio NaOH al 50%, una vez virando a color negro se tituló con ácido sulfúrico, H_2SO_4 , en la Figura 4.7 se observa cómo se realizó el montaje para realizar la prueba de destilación rápida.



Figura 4.7 Equipo ensamblado para la destilación rápida

4.6 Composteo en biorreactores (etapa 2)

Una vez concluido el tratamiento de lavado del suelo con el tensoactivo Tween 80, se realizó un composteo intensivo en reactor biológico, a éste se le incorporó el sargazo como co - sustrato.

4.6.1 Montaje del composteo intensivo

Se utilizó sargazo como co - sustrato, se aplicó en una proporción no mayor al 20 % de la masa del suelo. Se adicionaron 450 g de sargazo por cada 2,700 g de suelo que representaron el 16.4 %. El sargazo se cortó en trozos de aproximadamente 1 cm y se mezcló con el suelo (ver Figura 4.8), se humectó con 1200 mL de lixiviados de lombricomposta como bioestimulante y para el control de la humedad; posteriormente se colocó en un vaso de precipitados de 4 L.



Figura 4.8 Mezcla de suelo y sargazo antes de composteo

El biorreactor se introdujo en una pecera de 50 L, el cual se tapó con hule cristal realizándole a éste 10 agujeros para garantizar la oxigenación, además de que se realizaba volteo diario. A la pecera se le incorporó agua hasta que el vaso estuviera inmerso (altura de 20 cm), se instalaron dos calentadores termo regulables para que se mantuviera la temperatura constante a 34° C, la pecera se tapó con una toalla para que absorbiera la humedad generada, en la Figura 4.9 se muestra el montaje del biorreactor.



Figura 4.9 Montaje del reactor biológico

4.6.2 Monitoreo de las condiciones del composteo

El monitoreo de las condiciones del composteo se realizó por medio de un termostato durante cinco semanas, se verificó que la temperatura fuera constante de 34 °C (que era la capacidad de los calentadores), se realizó un mezclado del suelo - sargazo en el vaso para airear, se verificó que la humedad se mantuviera aproximadamente a un 50 - 60 % de su capacidad de campo y se determinó el pH. La primera y segunda semana se monitoreó dos veces al día. La tercera, cuarta y quinta semana sólo una vez cada tercer día.

Al término del composteo intensivo, se desmontó el biorreactor y se sacó el suelo del biorreactor para la siguiente etapa, que consistía en un proceso de fitorrestauración si no se cumplían los límites normativos, o llevar a cabo una evaluación de fitotoxicidad si se cumplían los límites de la NOM-138.

4.7 Fitotoxicidad (etapa 3)

Las pruebas de fitotoxicidad se realizaron con base en la guía 208 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) “Directrices para pruebas de productos químicos. Pruebas para plantas terrestres: germinación y crecimiento de plántulas” (OCDE, 2006).

Con base en esta guía, se evaluó si el suelo restaurado presentaba fitotoxicidad, para tal efecto se ocuparon semillas de pepino, *Cucumis sativus*. Esta especie se seleccionó porque sus semillas son fácilmente disponibles y porque se ha sometido a pruebas de laboratorio que han arrojado resultados fiables en pruebas de toxicidad, ésta se encuentra en el listado de especies vegetales citadas en esta guía.

4.7.1 Montaje del experimento de fitotoxicidad

Después de la prueba de composteo intensivo y con la verificación de que se llegó a los límites permisibles de hidrocarburos pesados de la NOM-138, se dejó secar el suelo por una semana al ambiente y se acondicionó con un fertilizante Triple 17 (17% de N, 17 % de P y 17 % de K) con el fin de restituir nutrientes que pudieron haberse perdido en la etapa de lavado.

Como primera etapa se evaluó la viabilidad de las semillas de pepino. Se colocaron en un algodón con agua 10 semillas para evaluar su germinación en 5 días. La guía 208 de la OCDE establece que si el porcentaje de germinación en esta etapa es del 70 % o más las semillas son aptas para la experimentación (OCDE, 2006).

Una vez que el suelo estaba preparado para poder sembrar las semillas y con la verificación de que éstas eran viables, se prepararon los rizotrones para la prueba de fitotoxicidad.

El suelo se colocó en rizotrones de vidrio con dimensiones de 25 cm de longitud, diámetro de 5 cm y capacidad de 400 g de suelo aproximadamente (ver Figura 4.10). Se colocaron cuatro semillas de pepino por rizotrón, con tres réplicas, un testigo positivo con suelo limpio de la zona, un testigo negativo con suelo inicial contaminado sin tratamiento alguno, y 4 réplicas para el suelo restaurado. Una vez que los rizotrones contenían el suelo, se incorporó agua hasta capacidad de campo como se puede observar en la Figura 4.11.

Se evaluó el crecimiento de las plantas, una vez que emergió el 50 % de las semillas en el testigo positivo se contó el día 1 de la prueba y se desmontaron los rizotrones al día 2, monitoreando que siempre se mantuvieran a humedad en capacidad de campo (OCDE, 2006).



Figura 4.10 Rizotrones para la prueba de fitotoxicidad



Figura 4.11 Suelo en el proceso de humedecimiento a capacidad de campo

Los rizotrones se colocaron a una inclinación de 30° y se cubrieron con papel, esto porque las raíces huyen de la luz y con la finalidad de que al crecer tocan la superficie del vidrio y se pudieran visualizar para observar su crecimiento a lo largo de los 21 días como se muestra en la Figura 4.12.



Figura 4.12 Rizotrones con una inclinación de 30° y cubiertos.

Una vez que transcurrieron 21 días desde que el 50 % de semillas de los rizotrones del testigo positivo emergieron, se desmontó la prueba y llevaron a cabo mediciones de longitud de la parte aérea y de la raíz para evaluar los resultados respecto a los testigos.

5 Resultados y discusión

En este capítulo se muestran los datos obtenidos en la caracterización fisicoquímica del suelo y del sargazo (inicial y final), la etapa del lavado, del composteo simulado, incluyendo los resultados de la determinación de la concentración de HTP durante el proceso. Finalmente, la prueba de viabilidad de las semillas de pepino y la fitotoxicidad de los suelos evaluados.

5.1 Caracterización fisicoquímica inicial del suelo

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos, estudio, muestreo y análisis, en la Tabla 5.1 se resumen los resultados de la caracterización del suelo, que corresponde al testigo positivo (suelo sin contaminar de la zona), suelo inicial contaminado que fungió como testigo negativo, suelo lavado una vez y dos veces y al suelo restaurado. Se muestran también algunos parámetros que se llevaron a cabo para caracterizar el sargazo.

Tabla 5.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica de los suelos evaluados

Parámetro	Suelo testigo positivo (suelo limpio de la zona)	Suelo inicial contaminado	Suelo lavado una vez	Suelo lavado dos veces	Suelo restaurado
pH (unidades)	7.14 ± 0.1	6.7 ± 0.1	7.04	7.05 ± 0.01	7.00
Color	10 YR 4/2 marrón gris oscuro	10 YR 2/1 negro	(*)	(*)	10 YR 3/2 Marrón gris muy oscuro
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.076 ± 0.001	0.184 ± 0.01	0.065 ± 0.004	0.032 ± 0.001	ND
Textura del suelo	Arenoso	(*)	(*)	(*)	(*)
Densidad aparente (g/cm ³)	1.106 ± 0.04	(*)	(*)	(*)	(*)
Densidad real (g/cm ³)	2.43 ± 0.254	(*)	(*)	(*)	ND
Espacio poroso (%)	54.05	(*)	(*)	(*)	ND
Humedad higroscópica (%)	0.66 ± 0.12	(*)	(*)	(*)	(*)
Humedad capilar (%)	10.43 ± 2.29	ND	ND	ND	ND
Humedad capacidad de campo (%)	11.09 ± 2.16	ND	ND	ND	ND
Materia Orgánica (%)	5.08	20.24	(*)	(*)	ND
Nutrientes N (nivel) P (nivel) K (nivel)	Medio Ausente Alto	Alto Medio Traza	(*)	(*)	Alto Medio Medio
Composición Textural % arena % limo % arcilla	93 7 0	93 7 0	(*)	(*)	(*)
Nitrógeno (%)	0.123 ± 0.0001	(*)	0.1236	0.1240	ND

(*) Sin cambio

ND = no determinado

- Composición textural. Es la proporción relativa por tamaños de partículas de arena, limo y arcilla, las cuales al combinarse generan las clases texturales. El suelo que se utilizó presentó después de la prueba con el Bouyoucos, un 93% de arena y 7% de limo.
- Textura. Con base en el triángulo de texturas de la NOM-021 y los porcentajes obtenidos en la composición textural, se obtuvo como resultado un suelo arenoso.
- Densidad aparente. La NOM-021 establece que valores mayores a 1.32 g/cm^3 corresponde a suelos arenosos, por su mayor densidad, mientras que los suelos orgánicos tienen una densidad más baja. En el caso del suelo de la experimentación tiene ambas características, que corresponden a un suelo arenoso proveniente de los HTP, con alta materia orgánica, con una densidad aparente de 1.12 g/cm^3 . Esto indica un impacto de los HTP en la densidad aparente, ya que, siendo un suelo arenoso, presenta una densidad aparente menor al valor de referencia de la norma.
- En los suelos el valor de la densidad real normalmente varía entre 2.40 y 2.75 g/cm^3 . Si en el suelo hay presencia de minerales pesados el valor puede exceder de 2.75 g/cm^3 . Si hay alta materia orgánica o existe alguna influencia por materiales volcánicos, puede descender hasta 1.90 g/cm^3 o valores menores (Reyes, 1996). El suelo testigo como el contaminado presentaron una densidad real de 2.43 g/cm^3 que es un valor típico para suelos arenosos.
- La porosidad del suelo está ligada a la aireación del suelo, y ésta a su vez es indispensable para la absorción activa del agua. En este proyecto se trabajó con un suelo arenoso que presentó un 54.05% de espacio poroso, por lo que el movimiento del aire y del agua es muy rápido debido a la abundancia de macroporos, esta alta porosidad es acorde a suelos con textura arenosa (Reyes, 1996).
- Color. Este parámetro se obtiene por comparación con las tablas de color Munsell, las cuales permiten unificar la denominación del color (Reyes, 1996). El suelo testigo presentó un color marrón gris oscuro, mientras que el suelo contaminado presentó un color negro causado por la presencia del combustóleo y el suelo restaurado presentó un color marrón gris muy oscuro porque, aunque ya se encuentra en niveles de HTP normativos aún contiene una concentración que contribuye a que el color sea más oscuro en relación al suelo sin contaminar.

- Humedad higroscópica. Es la que se encuentra adsorbida en los coloides del suelo, por lo que en su mayor parte no puede ser tomada por las plantas (Reyes, 1996). El valor obtenido de 0.66% fue bajo y corresponde a la cantidad de agua presente dentro de los poros del suelo.
- Humedad capilar. Es la que se encuentra en forma de película alrededor de las partículas de suelo, ocupando los poros más pequeños. Forma parte del agua aprovechable para el crecimiento de las plantas, así como de la solución del suelo (Reyes, 1996). El suelo testigo presentó un 10.43% de este tipo de agua. En los demás suelos no se determinó ya que este parámetro se altera con la presencia de HTP por lo que su interpretación sería cuestionable.
- Humedad a capacidad de campo. Es el porcentaje de agua que retiene un suelo después de saturarse con agua procedente de la lluvia o el riego (Reyes, 1996). Su valor representa la máxima cantidad de agua disponible para las plantas, por lo que el suelo arenoso con el que se trabajó posee un 11.09 % de agua máxima. Cuando existe presencia de HTP, este valor cambia y generalmente disminuye por el carácter hidrofóbico del contaminante y al ser un parámetro que se altera, no se determinó.
- Materia orgánica (MO). El aporte de MO al suelo puede ser de origen animal o vegetal (Reyes, 1996). El suelo testigo presentó 5.08% de materia orgánica y con base en la NOM-021, se cataloga como valor alto, el suelo contaminado presentó un 20.24% de MO, considerado como muy alto. Esta diferencia de porcentajes entre el suelo testigo y el contaminado, es debido a la presencia del combustóleo con alta aportación de carbono orgánico.
- Nutrientes. Se cualifica en nivel de trazas, bajo, medio y alto. El suelo testigo presentó niveles de nitrógeno medio, fósforo ausente y potasio alto, mientras que el contaminado presentó niveles de alto, medio y traza respectivamente; la alteración que sufrió este último probablemente fue por la presencia del hidrocarburo. Con la adición de nutrientes en el suelo restaurado se incrementaron los niveles a alto de N, medio de P y medio de K.
- Conductividad eléctrica. Con base en la NOM-021, la clasificación de los suelos se obtiene por sus valores de conductividad eléctrica, el suelo testigo presentó un valor de 0.076 dS/m, el suelo inicial contaminado con un valor de 0.184 dS/m, el suelo lavado una vez con una conductividad de 0.065 dS/m, el suelo lavado dos

veces con un valor de 0.032 dS/m, lo cual da como resultado, suelos con “efectos despreciables de la salinidad”, este efecto es asignado para valores <1.0 dS/m.

El sargazo presentó un pH de 8.39 unidades lo cual representa un valor ligero de alcalinidad, esto no afectó el pH del suelo, ya que no hubo descomposición de fuentes sencillas de carbono, y el nitrógeno no se convirtió en amoníaco. Se obtuvo un valor de conductividad eléctrica de 0.680 dS/m lo cual quiere decir que tiene efectos despreciables de salinidad y no incrementa la presencia de sales en el suelo.

5.2 Composteo intensivo

Las condiciones del composteo se monitorearon durante las 5 semanas (ver Figura 5.1), la primera y segunda semana se monitoreó dos veces al día, en donde el volumen inicial fue de $4626.6 \pm 146.21 \text{ cm}^3$ y al finalizar se obtuvo una reducción del 3.33%, en la cuarta semana su volumen disminuyó 6.5%, en la quinta semana su volumen fue de $4178.94 \pm 46.75 \text{ cm}^3$, siendo esto un 9.6% de disminución y el volumen al finalizar el proceso fue de $3582.91 \pm 526.94 \text{ cm}^3$, lo que reporta una reducción porcentual de 22.5%, en dicha semana ya no se alcanzaba a percibir visualmente el sargazo.

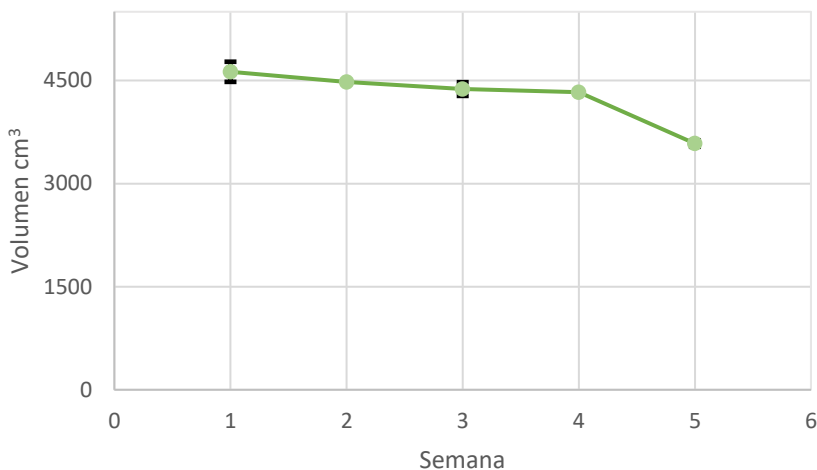


Figura 5.1 Reducción de volumen en el composteo intensivo

La Figura 5.2 muestra una fotografía de la consistencia del suelo en la quinta semana de composteo, donde ya no se visualiza el sargazo.



Figura 5.2 Suelo restaurado en la quinta semana de composteo

El monitoreo de la temperatura de la composta se presenta en la Figura 5.3, ésta dependió de la capacidad de los calentadores. La primera semana se tuvo una temperatura promedio de 26.69 ± 1.08 °C, la segunda tuvo un aumento notable a 33.75 ± 1.23 °C, en la tercera semana se mantuvo en 34.75 ± 0.22 °C, la cuarta semana aumentó considerablemente a 36.02 ± 0.96 °C y ya en la quinta semana redujo su temperatura a 35.8 ± 1.14 °C.

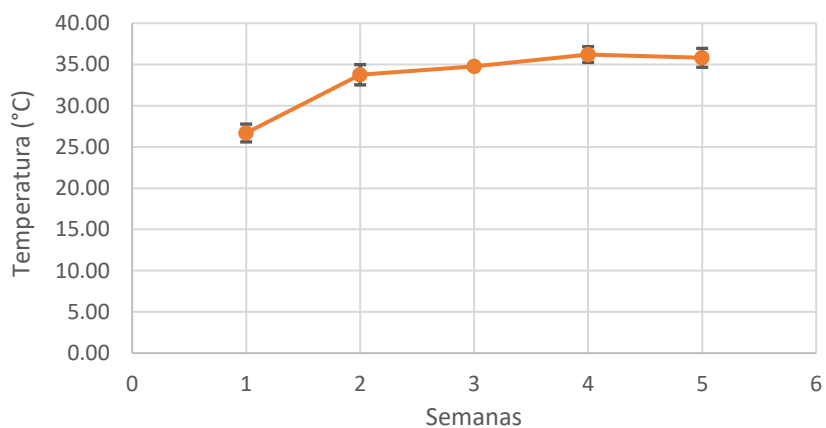


Figura 5.3 Monitoreo de temperatura semanal del composteo intensivo

La temperatura nunca fue menor a 25 °C, ni mayor a 37 °C, intervalo que fue controlado con calentadores eléctricos. La temperatura se logró estabilizar en la segunda semana y se mantuvo siempre en promedio de 34° C, esta fue la temperatura recomendada para el proceso de compostaje, influyo de manera positiva para que los microorganismos siguieran degradando los hidrocarburos que contenía el suelo y de esta manera se llegara a un porcentaje más alto de eficiencia de degradación.

5.3 Concentración de hidrocarburos totales

En la Tabla 5.2 se muestran las concentraciones de HTP y las eficiencias de degradación en cada etapa del tren de tratamiento, después del primero y segundo lavado de suelo y después del composteo intensivo.

Tabla 5.2 Concentraciones obtenidas de HTP y eficiencia de remoción del suelo estudiado en cada etapa de restauración concentración inicial $69676.7 \pm 7297.4 \left(\frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}} \right)$

Concentración de HTP después del primer lavado $\left(\frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}} \right)$	Eficiencia de degradación (%)	Concentración de HTP después del segundo lavado $\left(\frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}} \right)$	Eficiencia de degradación (%)	Concentración de HTP después del composteo intensivo $\left(\frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}} \right)$	Eficiencia (%)
58866.6 ± 3714.7	15.51	33173 ± 1877.40	52.39	3919.3 ± 753.8	94.25

Como se muestra en la Tabla 5.2, comparando los resultados de las concentraciones de HTP que se muestran, después de la concentración inicial $69676.7 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$, se realizó el primer lavado y ésta disminuyó en 15.51%. Dada la concentración aún tan alta, se llevó a cabo un segundo lavado, llegando a una concentración de $33173 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$. Con estos resultados tan alejados del límite normativo de $6000 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$ de la NOM-138, se procedió al composteo intensivo donde se logró una concentración de $3919.3 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$ y una eficiencia final de 94.25%, cumpliendo con la normatividad referida para uso de suelo industrial y comercial.

En la Figura 5.4 se observa que en el suelo lavado dos veces se obtuvo una disminución de la concentración de HTP de $36503.7 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$, lo cual significa que el lavado con el tensoactivo Tween 80 tuvo la capacidad de aumentar la disponibilidad del contaminante y solubilizar el compuesto hidrofóbico como lo fue el combustóleo (PAOT, 2010). Esto representó una eficiencia de remoción total con los dos lavados del 67.9% del hidrocarburo que presentaba el suelo. Autores como Riojas y colaboradores (2010), experimentaron con el surfactante Tween 80 mezclado con el solvente natural D- Limoneno en la biorremediación de un suelo contaminado con diésel, la concentración inicial de HTP fue de $5950 \frac{mgHTP}{kg \text{ suelo}}$, una vez lavado el suelo con el tratamiento mezcla, resultó un porcentaje de remoción del 80%, y al lavarlo individualmente con el Tween 80 se obtuvo una remoción del 62%. Aunque se tuvo otro contaminante y Riojas y colaboradores experimentaron con una mezcla de

surfactante-solvente, la remoción es alta pero comparativamente la masa removida es mucho menor a este trabajo con combustóleo.

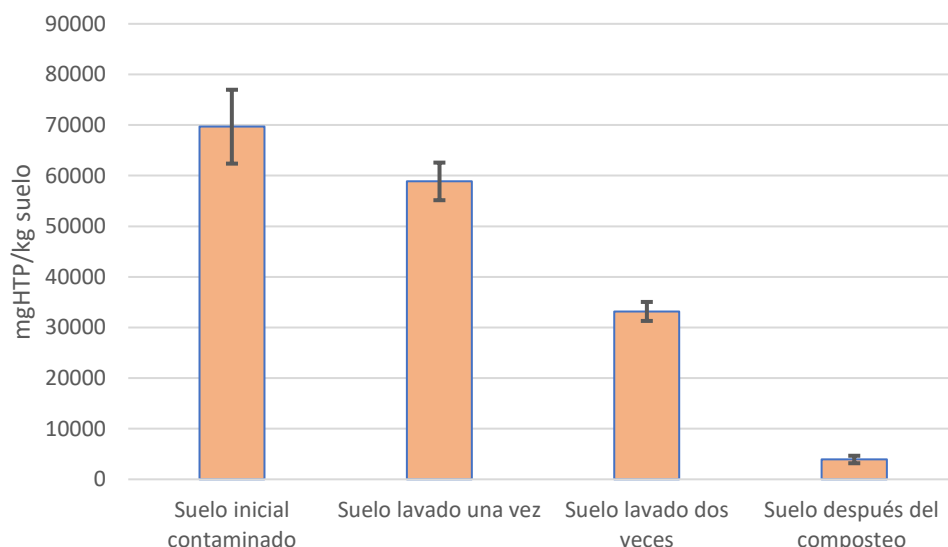


Figura 5.4 Grafica de concentración de HTP en cada etapa de restauración del suelo

Alegría y colaboradores (2015), realizaron la restauración de un suelo contaminado con combustóleo con un tren de tratamiento químico-biológico, con una concentración inicial de $54145 \pm 1288 \frac{mgHTP}{kg\ suelo}$, utilizando la técnica de lavado (la cual se realizó 6 veces), con el tensoactivo Lauril Sulfato de Amonio. Su remoción alcanzada fue del 33.35%, la mitad de la eficiencia que se obtuvo en este trabajo. Aunque no se trabajó con el mismo tensoactivo, existió un porcentaje de remoción tanto en Alegría y colaboradores (2015), como en este proyecto, ya que los tensoactivos tiene la capacidad de solubilizar compuestos hidrofóbicos como lo son los hidrocarburos (PAOT, 2010), en estos casos combustóleo.

En este trabajo, al realizar el composteo intensivo se llegó a una eficiencia de 94.25% de remoción del hidrocarburo, esto favorecido por la presencia de microorganismos endémicos que utilizaron el hidrocarburo como fuente de materia orgánica. El estudio de Medina y colaboradores (2014), que consistió en la remediación de un suelo contaminado con $27421 \pm 80 \frac{mgHTP}{kg\ suelo}$ de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) mediante composteo a nivel laboratorio, a 30°C por 30 días reporta una remoción del contaminante de un 70%. Aunque no se tuvo el mismo contaminante, se puede discutir que en dicho trabajo se lograron altas remociones con una combinación de oxidación química y composteo posterior, reduciendo parcialmente la toxicidad del sistema sin disminuir significativamente la concentración total de PAH, ya que

inicialmente existió un drástico descenso de poblaciones microbianas, que pudo ser recuperado rápidamente luego de la etapa de composteo (Medina *et al.*, 2014).

En comparación con un estudio realizado por Pérez y colaboradores (2016), en la biorremediación en campo de un suelo contaminado con gasolina y diésel mediante adición de composta, utilizando biopilas y manteniendo una humedad del 30%, durante 6 meses, con una concentración inicial en gasolina de $1448.16 \frac{mgHTP}{kg\ suelo}$ y de diésel de $2111.16 \frac{mgHTP}{kg\ suelo}$ se obtuvo una remoción total de la gasolina y una disminución del 93.22% de diésel. En dicho trabajo se tienen concentraciones por debajo de límites normativos por lo que la eficiencia fue del 100%, el suelo que sanearon tenía características de una arcilla muy plástica por lo que la adición de composta le dio una textura adecuada para facilitar la incorporación de oxígeno (Pérez *et al.*, 2016) y poder obtener una mayor eficiencia de degradación de HTP.

5.4. Pruebas de viabilidad y fitotoxicidad

En esta sección se presentan los resultados relacionados con la viabilidad de las semillas que deben de contar con un 70% mínimo de germinación para ser aptas para el estudio. También se evaluaron los efectos fitotóxicos que produce un suelo contaminado en la planta de pepino (*Cucumis sativus*), evaluando los parámetros, medidos a través de indicadores relativos de fitotoxicidad para las variables de altura y longitud.

5.4.1 Viabilidad

Se tuvo una viabilidad para las semillas de pepino del 100%, la Guía OCDE 208 establece que, si los resultados son iguales o mayores al 70% de viabilidad, las semillas son aptas para la prueba. Se cumplió con los requisitos y se procedió a llevar a cabo la experimentación de fitotoxicidad. En la Figura 5.5 se muestra la germinación de las semillas al 100%.



Figura 5.5 Prueba de viabilidad.

5.4.2 Pruebas de fitotoxicidad

Una vez que se prepararon los rizotrones con las diferentes condiciones experimentales: 1) testigo positivo, con suelo limpio de la zona 2) testigo negativo con suelo contaminado inicial y 3) suelo restaurado; se monitorearon la humedad y el crecimiento de la parte aérea y de la raíz durante 21 días posteriores a que el 50% de las plantas en el testigo positivo emergieron como lo señala la guía OCDE (OCDE, 2006).

En la Figura 5.6 se muestran las evidencias a diferentes tiempos, se observa la figura a) la cual es del día 1, en donde las plantas ya estaban germinadas al 50%, la imagen b) es del día 5, en donde se observa que existió un crecimiento rápido de las plantas, las fotografías c) y d) son a los 21 días, en donde el crecimiento de las plantas y de las raíces ya ha sido exponencial, la imagen e) es la parte aérea a los 21 días, en la imagen f) se puede observar que el experimento se desmontó sin fracturar las raíces, en la imagen g) se muestra un ejemplo de la medición la longitud de las plantas en los suelos, y en la última imagen h), se ejemplifica una comparación final de longitudes de los tres tipos de suelo.

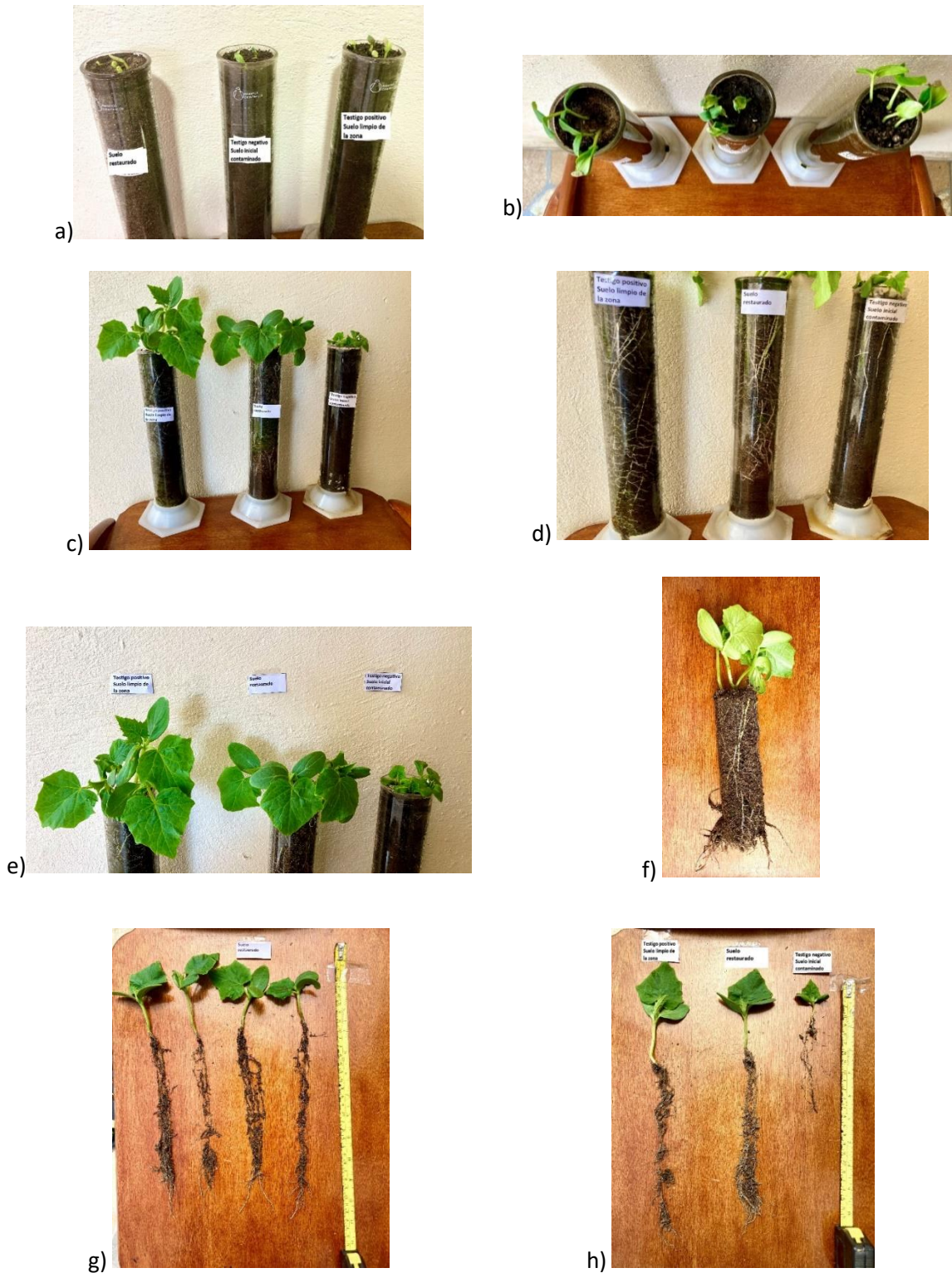


Figura 5.6 Parámetros de crecimiento: a) germinación de semilla al 50% respecto al testigo, b) quinto día de crecimiento, c) planta a los 21 días, d) raíz a los 21 días de crecimiento, e) parte aérea a los 21 días de crecimiento f) desmontaje de experimento, g) longitud de la raíz de suelo restaurado, h) longitud de los tres tipos de suelo

5.4.3 Longitud de crecimiento de la especie vegetal

En la figura 5.7 se muestra el crecimiento de la parte aérea de los tres suelos, en donde se visualiza que el suelo restaurado y el suelo testigo positivo (sin contaminar), fueron creciendo simultáneamente, mientras que el suelo testigo negativo (contaminado) tuvo dificultades para alcanzar la misma longitud que los demás, esto debido a que el suelo contaminado inicialmente poseía una alta concentración de HTP y esto afecta la fertilidad del mismo.

A los 21 días se distingue que el suelo testigo positivo ha alcanzado una longitud de 11.20 ± 0.6 cm y éste se puede tomar como un referente, y el suelo restaurado una longitud de 10.50 ± 0.6 cm, mientras que suelo testigo negativo sólo alcanzó una longitud de 4.15 ± 0.5 cm.

El suelo restaurado presentó una inhibición de sólo un 6.25% menos que el suelo testigo positivo y el suelo contaminad inicial tuvo 63% menos generación de biomasa, en términos de longitud, que el suelo testigo positivo.

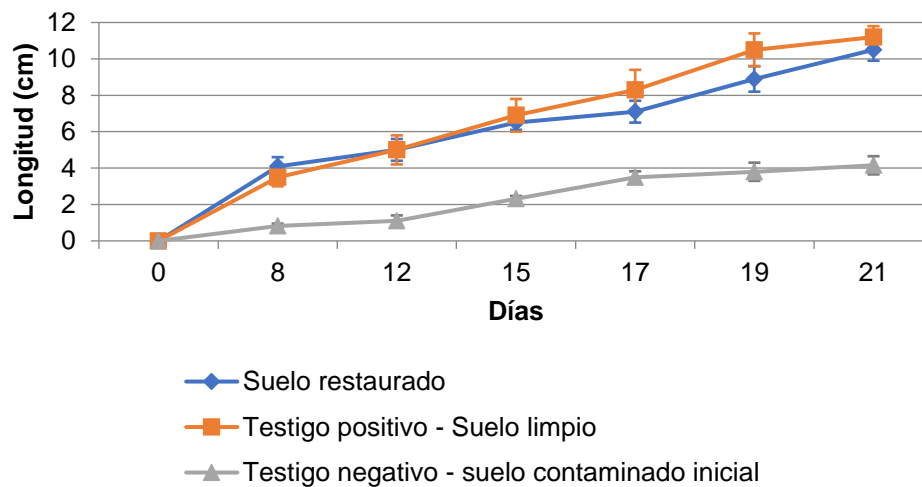
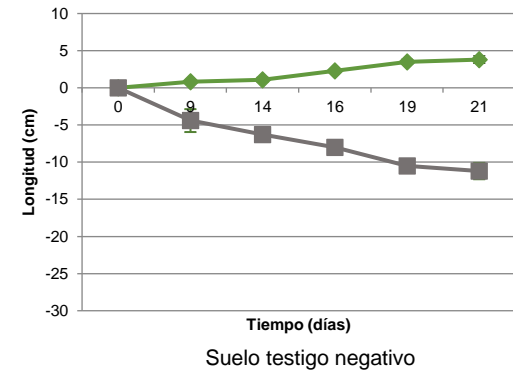
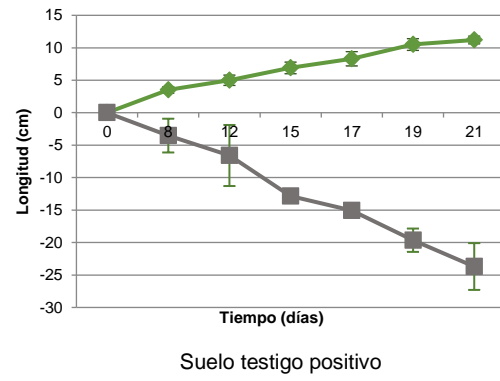
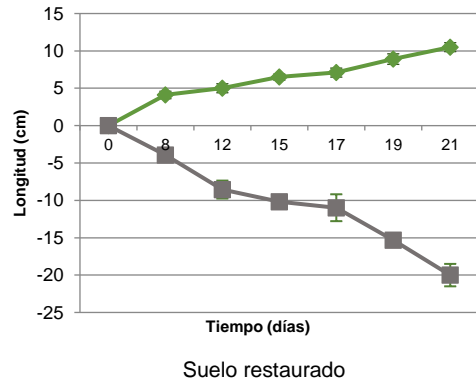


Figura 5.7 Longitud de la parte aérea de los tres suelos

En la figura 5.8 se muestran las gráficas de la longitud de las raíces y de la parte aérea de la especie vegetal desde el día 0 hasta los 21 días de su crecimiento en los suelos de experimentación.



- Parte aérea —
- Raíz —

Figura 5.8 Longitud de la especie vegetal en los suelos de la experimentación desde el día 0 hasta los 21 días

La longitud total que alcanzó la raíz a los 21 días de la especie vegetal con el suelo restaurado fue de 20 ± 1.5 cm, comparada con del suelo testigo positivo que fue de 23.69 ± 3.60 cm, mientras que el crecimiento de la raíz en el suelo testigo negativo fue de 11.2 ± 1.1 cm de longitud. La raíz del suelo restaurado mostró una inhibición del 16% respecto al suelo testigo positivo, mientras que el suelo testigo negativo 52.7% menos que el suelo testigo positivo. El tren de tratamiento fue favorable para el crecimiento de la especie vegetal si se compara con el suelo inicial contaminado y el suelo testigo.

Los resultados obtenidos evidencian que en el suelo contaminado inicial presenta efectos fitotóxicos, sin embargo, el suelo restaurado tuvo un crecimiento que se puede comparar con el testigo aún cuando todavía no llega a los límites normativos para considerarlo de tipo agrícola.

6 Conclusiones

En este proyecto se evaluó un tren de tratamiento que consistió en una secuencia de dos lavados seguido por un proceso de composteo en un suelo contaminado con combustóleo, posterior se realizó una prueba de fitotoxicidad.

La caracterización fisicoquímica del suelo mostró una textura arenosa con alta materia orgánica, presentó una porosidad de 54.05% lo cual resulta en una abundancia de macroporos, benéfica para la difusión del tensoactivo en ellos. El color del suelo testigo fue marrón gris oscuro, mientras que el suelo contaminado presentó un color negro, a causa de la presencia del combustóleo. La materia orgánica en el suelo testigo fue de 5.08% y en el suelo contaminado 20.24%, valor considerado muy alto, resultado de la presencia de combustóleo.

Se realizaron dos lavados con el tensoactivo Tween 80, obteniéndose una eficiencia de remoción de 52.39% de HTP, en esta etapa no se logró llegar a la concentración de $6,000 \frac{mgHTP}{kg\ suelo}$ que establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para un tipo de suelo industrial y comercial.

El composteo posterior a la secuencia de dos lavados con tensoactivo, se realizó en un biorreactor, se agregó 16.4 % en masa de sargazo como cosustrato, a una temperatura constante de 34 °C y con control de aireación y humedad. Al término de esta etapa, la eficiencia total del tren de tratamiento fue del 94.25%, con lo que se logró la concentración final de $3919.3 \frac{mgHTP}{kg\ suelo}$, que se encontró dentro de los límites normativos que establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, para el uso de suelo industrial y comercial.

Posterior al tren de tratamiento y una vez restaurado el suelo, se llevó a cabo una prueba de fitotoxicidad según la guía OCDE 208, se puede concluir que el suelo testigo positivo (sin contaminar) fue en el que presentó mayor generación de biomasa en el crecimiento de la especie vegetal pepino (*Cucumis sativus*), seguido por el suelo restaurado que mostró pequeñas diferencias de tamaño y biomasa siendo un 16% de inhibición respecto al suelo testigo positivo (sin contaminar).

Finalmente, dada la eficiencia lograda en el tren de tratamiento, se puede proponer como una tecnología viable para suelos contaminados con hidrocarburos pesados que presenten las mismas características fisicoquímicas. Además, la incorporación del sargazo como cosustrato en el composteo evidenció dos ventajas, la primera es

que presenta una opción de aplicación en una tecnología que favoreció la restauración de un suelo contaminado y la segunda es la canalización para el aprovechamiento a este tipo de materiales que presentan una problemática ambiental por la cantidad de grandes masas en las playas.

7 Referencias

Alegría, Y., Ruiz, A., Areydi, J., Zárate, R., Sotelo, P., Beltrán, M., Velasco, M., 2015. Restauración de un suelo contaminado con hidrocarburos. 2° Congreso Nacional AMICA. México, CDMX. Disponible en: <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/118.pdf>. Consultado el: 27 de abril del 2020.

Alexander, M., 1994. Biodegradation and Bioremediation. Ithaca, New York: Second Edition, Academic Press.

Ardalan, Y., Jazini, M. y Karimi, K., 2018. Sargassum agostifolium brown macroalga as a high potential substrate for alginate and ethanol production with minimal nutrient requirement. Algal research, v.26, pp 29-36.

Ávila, M., 1999. La biorremediación procesos y aplicaciones, Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. 23(2): 1-33

Beltrán, M., Vaca, M., Chacalo, A., Alcalá, J., 2006. Variación de la eficiencia de la biorrestauración con pastos, a diferentes profundidades de la rizósfera, para suelos contaminados con diésel. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y prácticas. México, CDMX, Vol. 1, Núm. 1, ISSN 0718-378X.

Beltrán, M., Padilla, A., Quintana, M., Labastida I., Armienta, M. 2019. Fitotoxicidad de un suelo restaurado por la tecnología de lavado con tensoactivos. IV Congreso de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental. AMICA. 5 th Internacional Conference of Greening of Industry Network. Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ciudad de México, México. Disponible en: <http://www.congresoamica2019.com> Consultado el: 25 de septiembre del 2020.

Bernal, A., 2015. Remediación de un suelo contaminado con diésel mediante la técnica de lavado ex situ empleando surfactantes a diferentes temperaturas. Tesis. Departamento de ingeniería química industrial. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. México, D.F. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18235/1/25-1-16835.pdf> Consultado el: 23 de septiembre del 2020.

BP Statistical Review of World Energy, 2013. What's inside? Disponible en: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/goldenstein1/docs/bp2011.pdf> Consultado el: 22 de mayo del 2020

Campitelli, P., Ceppi, S., Velasco, M. y Rubenacker, A., 2014. Compostaje, obtención de abonos de calidad para las plantas. Argentina: Editorial Brujas.

Casco, J. M. y Bernat, S., 2008. Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. Compostaje, ISBN 978-84-8476-346-8, págs. 111-140.

Chaîneau C.H., Morel J.L., Oudot J. 2000. Bioremediation and biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize. J. Environ Qual. 29:569-578

Chan, J. G. C. Q., 2015. Evaluación de la degradación de hidrocarburos totales del petróleo por bioestimulación con abonos orgánicos asociados a especies arbóreas Tesis. Disponible en: http://aleph.ecosur.mx:8991/exlibris/aleph/a22_1/apache_media/4F5KEI Consultado el: 22 de mayo del 2020.

CNH, Comisión Nacional de Hidrocarburos. 2019. Reservas de hidrocarburos en México, Conceptos fundamentales y análisis. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435679/20190207_CNH-Reservas-2018_vf_V7.pdf Consultado el: 20 de mayo del 2020.

CONACYT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 2019. Arribazón de sargazo a las costas mexicanas. Disponible en: <https://www.conacyt.gob.mx/sargazo/index.php/materiales-de-consulta/18-materiales/99-arribo-de-sargazo-a-las-costas-mexicanas-2> Consultado el: 20 de mayo del 2020.

Cortés, A., 2011. Evaluación del efecto de un nuevo biosurfactante en el proceso de remoción de diésel en el suelo. Tesis. Programa de maestría y doctorado en ingeniería ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4510/Tesis.pdf?sequence=1> Consultado el 27 de febrero del 2021.

CDI. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. 2008. Programa Organización Productiva para Mujeres Indígenas. Gobierno Federal. Disponible en: <http://www.cdi.gob.mx/dmdocuments/composta.pdf> Consultado el: 30 de julio del 2020

DOF. Diario Oficial de la Fereación. 2002. Norma oficial mexicana de emergencia, que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración. NOM-EM-138-ECOL-2002UNINET. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ecol/ecol138em-02.pdf> Consultado el: 27 de abril de 2020.

Dorronsoró, C., Diez, M., Martín, F., Sierra, M., Simón, M., García, I., Fernández, E., Fernández, J., Aguilar, J. 2008. Dpto Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias Universidad Granada. Disponible en: <http://www.edafologia.net/desconta/quimicas2.pdf> Consultado el: 8 de mayo del 2020.

Ecoamérica, 2001. Compostaje: creciendo en calidad. Tecnologías limpias para el nuevo milenio, p. Chile. Ed. N°9.

EPA. Environmental Protection Agency.2000. Introduction to Phytoremediation. Cincinnati, Ohio : National Risk Management Research Laboratory.

EPA. Environmental Protection Agency. 2001. Treatment technologies for site clean-up: annual status report. Disponible en: <https://nepis.epa.gov> Consultado el: 8 de mayo del 2020.

EPA. Environmental Protection Agency. 2013 Disponible en: https://clu-in.org/download/remed/asr/14/SRR_14th_2013Nov.pdf Consultado el: 6 de mayo de 2020.

Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. y Schroeder, E. D., 1998. Principios de biorrecuperación: tratamientos para la descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y fisicoquímicos. España: McGraw-Hill.

FAO. Organización de las Naciones Unidas. 2018. La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro. Disponible en: <http://www.fao.org/faostories/article/es/c/1126977/> Consultado el: 15 de mayo de 2020.

Fernández, L. L. 2000. Tecnologías de biorremediación en suelos. pp. 700-705. In: R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta y N. E. García-Calderón (eds.). La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Investigaciones y educación hacia la sostenibilidad edáfica para el tercer milenio. Tomo II. Colegio de Postgraduados Universidad Autónoma de México-Universidad Autónoma de Chapingo. Montecillo, estado de México

Fernández, L., Rojas, N., Roldán, T., Ramírez, M., Zegarra, H., Uribe, R., Reyes, R., Flores, D., Arce, J., 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. México, CDMX: Instituto Mexicano del Petróleo.

Figueroa L. V., Rojas F. J., Meza V., Flores L., 2016. Degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos de residuos de barrido de calles usando compost. Rev. Soc. Quím. Perú vol.82 no.2 Lima abr./jun. 2016. SCIELO. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000200007 Consultado el: 30 de septiembre del 2020.

Forro, J., 1987. Microbial degradation of marine biomass. En Bird KT, Benson PH (eds) Seaweed Cultivation for Renewable Resources. Amsterdam: Elsevier.

Freeman, H.M. 1998. Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal. Mc Graw-Hill, Inc. New York. 1,437 pp.

Gautam K.K. y Tyagi V.K. (2006). Microbial surfactants: a review. J. Oleo Sci. 55, 155–166.

Gang, L., Shuai, G. y Jinxuan, H., 2016. The influence of clay minerals and surfactants on hydrocarbon removal during the washing of petroleum-contaminated soil. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894715013959#> Consultado el 15 de mayo del 2020.

García M., Navarro M., Velázquez C., Velázquez J. 2013. Elaboración de abono orgánico a base de lombriz roja californiana. Estudios agrarios. Procuraduría agraria. Universidad Layout. Disponible en: http://www.pa.gob.mx/publica/rev_53-54/analisis/elaboraci%C3%B3n_abono.pdf Consultado el 29 de octubre del 2020.

Gaspar M.L., Cabello M.N., Cazau M.C., Pollero R.J. 2002. Effect of phenanthrene and Rhodotorulaglutinis on arbuscular mycorrhizal fungus colonization of maize roots. Mycorrhiza 12:55-59.

Haritash, A. K. y Kaushik, 2009. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH): A review. Journal of Hazardous Materials, pp. vol. 169, No. 1-3 (September), pp. 1-15.

Hart, R. (1985). Conceptos básicos sobre agroecosistemas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Pp. 56.

Hernández, I., Navas, G. y Infante, C., 2016. Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v33n3/0188-4999-rica-33-03-495.pdf> Consultado el: 17 de junio de 2020.

Herrera J., Riffo, M., 2006. Programa de capacitación y entrenamiento para la introducción de la tecnología de compostaje y uso de compost. Manual de compostaje y su utilización en la agricultura. Universidad de las Américas. Fundación para la innovación agraria. Gobierno de Chile. Disponible en: http://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/145834/FIA-FP-V-2004-1-P-021_MA1.pdf?sequence=3&isAllowed=y Consultado el: 30 de octubre del 2020.

Hoyos, J., Vargas, C., Velasco, R. Evaluación de compost obtenido en pila móvil empleando mezclas de gallinaza de jaula con material celulósico. Facultad de ciencias agropecuarias. Vol. 8, No. 1, enero-junio 2010. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v8n1/v8n1a07.pdf> Consultado el: 30 de octubre del 2020.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2017. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/economia/petroleo.asp> Consultado el: 27 de abril del 2020.

Infante, C., 1998. Biorremediación de derrames de hidrocarburos en ambientes naturales. Memorias del IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. Caracas, Venezuela: colección simposio, volumen II. Editorial Equinoccio, Ediciones de la universidad Simón Bolívar, Caracas.

INSC. Inventario Nacional de Sitios Contaminados. 2018. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_SITIOS03_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=* Consultado el: 27 de abril de 2020.

Jimenez, D., Medna, S. y Gracida, J., 2010. Propiedades, aplicaciones y producción de biotensoactivos: una revisión. Scielo. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000100006 Consultado el: 18 de mayo del 2020.

Jimenez, R., 2008. Elementos históricos para la interpretación del régimen constitucional del petróleo de los mexicanos.. México, CDMX: El petróleo en la historia y la cultura de México (99-118).Centro de Producción Editoria.

Kao, C. M., y Prosser, J., 2001. Evaluation of natural attenuation rate at a gasoline spill site. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 82 (3): 275-289.

Kirtland, B. C., Aelion, C. M. y Stone, P. A., 2000. Monitoring anaerobic natural attenuation of petroleum using a novel in situ respiration method in low-permeability sediment. *Bioremediation Journal*, pp. 4 (3): 187-201.

Lasat, M., 2002. Phytoremediation of toxic metals: biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, pp. pp. 109-120.

Lors, Christine; Ryngaert, Annemie; Périé, Frédéric; Diels, Ludo; Damidot, Denis, 2010. Evolution of bacterial community during bioremediation of PAH in a coal tar contaminated soil. *Chemosphere*, pp. vol. 81, No. 10 (November), pp. 1263-1271.

Lu, Mang; Zhang, Zhongzhi; Qiao, , Wei; Guan, Yueming; Xiao, , Meng ; Peng,, Chong, 2010. Removal of residual contaminants in petroleum-contaminated soil by Fenton-like oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, pp. vol. 179, No. 1-3 (July), pp. 604-611.

Mancheno, M., Arévalo, P., Romero, J., Matute , D., Ramos, R., 2017. Análisis fisicoquímico de combustibles líquidos obtenidos en el proceso de pirolisis de caucho vulcanizado. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-85962017000100084 Consultado el: 15 de mayo del 2020.

Manilla, E; Poggi, H; Chávez, B., Esparza, F; Barrera, J, 2004. Evaluación del funcionamiento de un tambor rotatorio aplicado a la biorremediación de un suelo. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33909608.pdf> Consultado el: 15 de mayo de 2020.

Martínez, A., M.P., Pérez, Pinto, J., Gurrola, B.A., Osorio, A.L., 2011. Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37020226009> Consultado el: 15 octubre de 2019.

Mihelcic, J. y Zimmerman, J., 2012. Bioingeniería. Disponible en: <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion/2-5-aplicaciones-de-los-biorreactores> Consultado el: 23 de mayo del 2020.

Medina, R., Di Clemente, N., Rosso, J. A. y Del Pano, M. T., 2014. Remediación de un suelo contaminado con hidrocarburos mediante oxidación química y compost. Disponible en: https://digital.cic.qba.gob.ar/bitstream/handle/11746/7192/11746_7192.pdf-PDFA.pdf?sequence=4&isAllowed=y Consultado el: 20 de mayo del 2020.

Molina-Barahonal., Rodríguez, R., Hernández, M., Vega, C., Zapata, O., Mendoza, A., Albores, A., 2004. Diesel removal from contaminated soils by biostimulation and supplementation with crop residues. *Applied Soil Ecology*, pp. vol. 27, No. 2 (October), pp. 165-175..

Monreal, R., 2008. El petróleo en la historia y la cultura de México. En José Suárez del Real y Agui-lera (Coord.), México, CDMX: México DF: Centro de Producción Editorial.

Navarro, V. R., 2009. Los desastres en su interacción con la ciencia, la tecnología y la sociedad. *MediSur*, revista electronica, pp. Vol 4, No. 2.

Nobre, R. C. M., y Nobre, M. M. M., 2004. Natural attenuation of chlorinated organics in a shallow sand aquifer. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 110 (1-3): 129-137.

Núñez, J. (2006). Manual de laboratorio de edafología. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Pp. 36.

OCDE. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Economicos. 2006. Guidelines for the testing of chemicals. Terrestrial plant test: Seedling Emergence and seedling growth test. N° 208, Adopted: 19 July 2016. Disponible en: <https://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/45377336.pdf> Consultado el: 13 de mayo del 2020.

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. y Villar, S., 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía CITME. Universidad de Alcalá España. 109p. Disponible en: https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf Consultado el: 3 de mayo del 2020.

Paillat, T., Moreau, E., Grimaud, P. O. y Touchard, G., 2000. Electrokinetic phenomena in porous media applied to soil decontamination. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 7: 693-704.

PAOT, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F., (2013), Lavado de Suelos con Surfactantes, edición 2010. Disponible en: http://www.paot.org.mx/centro/cursospaot/materialCurso4/Pre_sentacion_04.pdf Consultado el 23 de febrero de 2021.

PEMEX. Petróleos Mexicanos. 2020. Estadísticas petroleras. Disponible en: <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/IndicadoresPetroleros.aspx> Consultado el: 20 de mayo 2020.

Pérez, N., Palacios, S., Saval, S. 2016. Biorremediación en campo de un suelo contaminado con gasolina y diésel mediante adición de composta. Coordinación de bioprocesos ambientales. Instituto de Ingeniería UNAM, México D.F. 04510. Departamento de Edafología, Instituto de Geología, UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510. Disponible en:

https://smbb.mx/congresos%20smbb/veracruz01/TRABAJOS/AREA_VI/CVI-53.pdf

Consultado el 25 de febrero del 2021.

PROFEPA. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. 2018. Disponible en:

<https://www.gob.mx/profepa/prensa/atiende-profepa-emergencias-ambientales-y-restauracion-de-sitios-contaminados-hasta-su-total-remediacion>

Consultado el: 20 de mayo del 2020.

Reed, B. E., Carriere, P. C. y Moore, R., 1996. Flushing of a Pb(II) contaminated soil using HCl, EDTA,. Journal of Environmental Engineering, pp. 122 (1): 48-50.

Reyes, I. (1996). Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo, parte I. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa.

Riojas, H., Gortáres, P., Mondaca, I., Balderas, J., y Torres, L., 2010. Evaluación de la biorremediación aplicando mezclas de surfactante-solvente en el suelo contaminado con diésel. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 6 (2): 100-109, 2010. Disponible en:

<https://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v6-n2-4-evaluacion-de-la-biorremediacion-aplicando-mezclas-de-surfactante-solvente-en-suelo-contaminado-con-diesel.pdf>

Consultado el: 27 de febrero del 2021.

Riser-Roberts, E., 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers.p. 542 pp.

Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A., 2013. Manual de compostaje del agricultor. Santiago.

Ross, A. B., Jones, J. M., Chaiklangmuang, S., Pourkashanian, M., Williams, A; Kubica, K., Andersson, J., Kerst, T., Danihelka, P., Bartle, K. D., 2002. Measurement and prediction of the emission of pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace. Fuel, pp. 81 (5): 571-582.

Secretaria de salud, 2015. Normas oficiales mexicanas. Disponible en:

<https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>

Consultado el: 20 de mayo del 2020.

Sanz, A. T., 2014. Química Orgánica Industrial. Disponible en:

<https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-10.php>

Consultado el: 3 de mayo del 2020.

Schnoor, J., 1997. Phytoremediation. The University of Iowa, Department of Civil and Environmental Engineering, Center for Global and Regional Environmental Research, Iowa, Technology Evaluation Report, s.l.: TE-98-01.

SRE. Secretaría de Relaciones Exteriores. 2014. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164370/Resumen de la explicacion de la Reforma Energetica11_1_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164370/Resumen_de_la_explicacion_de_la_Reforma_Energetica11_1_.pdf) Consultado el: 22 de abril.

SEDEMA. Secretaría del Medio Ambiente. 2012. Producida y/o distribuida en el Distrito Federal. Los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta, México.

Sellers, K., 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers. p. 326 pp..

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudios, muestreo y análisis. Publicada en DOF: 21/12/2002. Disponible en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf> Consultado el: 20 de mayo del 2020.

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906604.pdf> Consultado el: 20 de mayo del 2020.

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2012. Que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2013. NOM-138-SEMARNAT/SSA12012. Que establece límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2017. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores19/conjuntob/indicador/05_peligr osos/5_3.html Consultado el: 20 de mayo del 2020.

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2019. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_SITIOS02_01&BIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=* Consultado el: 20 de mayo del 2020.

Semple, K. T., Reid , B. J. y Fermor , T. R., 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. Environ. Pollution , pp. Environ. Pollution 112: 269-283.

SHCP. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. 2019. Comunicado No. 042 Informes sobre la Situación Económica, las Finanzas Públicas y la Deuda Pública al Primer Trimestre de 2019. Disponible en: <https://www.gob.mx/shcp/prensa/comunicado-no-042-informes-sobre-la-situacion-economica-las-finanzas-publicas-y-la-deuda-publica-al-primer-trimestre-de-2019?idiom=es> Consultado el: 20 de mayo de 2020

Siciliano, S. D. y Germida. J. J., 1998. Mechanisms of phytoremediation: biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. Environ rev. 6:65-79.

Silos, J., 2008. Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos.. Cadiz, España: Universidad de Cadiz Primera Edición.

Sung, H. K., Hirasawa, I., Kim, W. S. y Chang, K. C., 2005. Morphological control of calcium carbonate crystallized in reverse micelle system with anionic surfactants SDS and AOT. Journal of Colloid and Interface Science, pp. 288 (2), 496-502.

Statista Research Department, 2020. Reservas probadas de hidrocarburos de petróleos mexicanos de 2007 a 2019 (en millones de barriles de petróleo crudo equivalente). Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/611755/reservas-probadas-de-hidrocarburos-de-la-empresa-petroleos-mexicanos/> Consultado el: 17 de mayo del 2020.

Torres, L., Zavala, P., Beltrán, M., Vaca, M., Iturbide, R., 2007. Combination of natural gums and synthetic surfactants for washing of a soil highly contaminated with crude. The American Association of Petroleum Geologists/Division of Environmental Geosciences., pp. All rights reserved, 1, 9.

Van Cauwenberghe, L., 1997. Electrokinetics. Disponible en:<http://www.gwrtac.org>. Consultado el: 12 de mayo del 2020.

Van Deuren, J., Wang , Z. y Ledbetter, J., 1997. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. 3a Ed. Technology Innovation Office, EPA. Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://www.epa.gov/tio/remed.html> Consultado el: 16 de abril del 2020.

Vinardell, M. e Infante, M. (1999). The relationship between the chain length of non-ionic surfactants and their hemolytic action on human erythrocytes. Comp Biochem Physiol C Pharmacol Toxicol Endocrinol; 124:117-20.

Volke, T. y Velasco, A., 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología.

Xuhui, M., Rui, J., Wei, X. y Jianguo, Y., 2015. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils. A review. *Journal of Hazardous Materials*, pp. 285, 419-435.

Yateem A., Balba A.T., Nawawy A.S., Al-awandhi N. 2000. Plants associated microflora and the remediation of oil-contaminated soil. *Int. J. Phytorem.* 2:183-191.

Zitrides, T. G. 1990. Bioremediation comes of age. *Pollution Engineering*, Vol. 22, No. 5, p 57-62.

Zhang, C., Jianling, Z., Xiaoying, F., Wei Li., Yueju, Z. Buxing, Han, 2008. Influence of surfactants on the morphologies of CaCO₃ by carbonation route with compressed CO₂. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. pp. 324, 167-170.