



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL COMPOSTAJE EN LA
REMEDIACIÓN DE SEDIMENTOS DE FONDO DE TANQUES DE
HIDROCARBUROS FRENTE A OTRAS TÉCNICAS DE TRATAMIENTO.

AUTOR

CHRISTIAN ESTÉFANO CARBONELL RODRÍGUEZ

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL COMPOSTAJE EN LA REMEDIACIÓN
DE SEDIMENTOS DE FONDO DE TANQUES DE HIDROCARBUROS
FRENTE A OTRAS TÉCNICAS DE TRATAMIENTO.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía

MSc. Miguel Ángel Gualoto Oñate

Autor

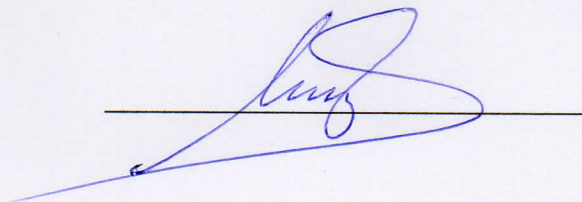
Christian Estéfano Carbonell Rodríguez

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido este trabajo, Evaluación de la eficiencia del compostaje en la remediación de sedimentos de fondo de tanques de hidrocarburos frente a otras técnicas de tratamiento, a través de reuniones periódicas con el estudiante Christian Estéfano Carbonell Rodríguez, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



Miguel Ángel Gualoto Oñate

Master of Science en Biología

C.I.: 170742935-1

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de la eficiencia del compostaje en la remediación de sedimentos de fondo de tanques de hidrocarburos frente a otras técnicas de tratamiento, una revisión, del estudiante Christian Estéfano Carbonell Rodríguez , en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Indira Fernandina Black Solís

Master en Conservación y Gestión del Medio Natural

C.I.: 171127356-3

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”



Christian Estéfano Carbonell Rodríguez

C.I.:1715967695

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mis padres, Cristian y Ximena por todo el apoyo que me brindaron para poder formarme profesionalmente.

Segundo a mi hermana Isabella y mis abuelos Diomedes y Susana, por la compañía y cariño que siempre me dieron.

Tercero a todos mis docentes universitarios, especialmente a Miguel Gualoto e Indira Black, por los conocimientos transmitidos y el ejemplo de buenos profesionales y conocedores de la materia.

Finalmente a mis compañeros por la gran amistad que forjamos y el gran soporte que fueron durante estos 5 años de carrera.

Dedicatoria

A mis padres, hermana, abuelos, amigos y quienes me brindaron su cariño y apoyo incondicional, por ser parte de este camino.

Resumen

Los residuos procedentes de las actividades hidrocarburíferas son uno de los residuos más tóxicos y contaminantes que existen en la actualidad, uno de ellos corresponde a los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos, los cuales se generan durante el almacenamiento de crudo durante los procesos de extracción, transporte y refinamiento. Es debido a esto que se presentan diferentes tratamientos para este residuos incluyendo técnicas de biorremediación, las cuales usan la capacidad degradativa de microorganismos como método para degradar este tipo de residuo, siendo una de ellas el compostaje. El presente documento presenta una comparación de la técnica del compostaje, con otras técnicas de tratamiento usadas para este tipo de sustancia, comparando su eficiencia en perspectivas económicas, tecnológicas, sociales y ambientales, además de una recopilación de experiencias usando esta técnica en este residuos y sus resultados con otras experiencias de tratamientos biológicos. Tras realizar esta comparación y recopilación de información y experiencias se logró obtener mejores resultados en cuanto a eficiencia y tiempos más cortos de tratamiento por parte del compostaje en comparación con otras técnicas biológicas de tratamiento y su cumplimiento con la normativa. También la investigación bibliográfica permitió identificar al compostaje, junto a las otras técnicas biológicas, como la alternativa más viable en cuanto a precio, puesto a que no involucra tanta inversión como tratamientos térmicos o de obra civil, adicionalmente se concluyó que las técnicas biológicas de tratamiento son las amigables en cuestiones ambientales y sociales por las condiciones que necesitan para su aplicación y su ausencia generación de fuentes de contaminación secundaria. En conclusión se logró evidenciar que el compostaje resulto ser la técnica más adecuada en diferentes aspectos para aplicarse al tratamiento de sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos.

Palabras clave: Sedimentos, compostaje, eficiencia, biorremediación.

Abstract

The waste from hydrocarbon activities are one of the most toxic and polluting residues that exist today, one of them corresponds to the sediments of the hydrocarbon tank bottoms, which are generated during the storage of crude oil during extraction processes, transportation and refinement. It is because of this that different treatments are presented for this waste including bioremediation techniques, which use the degradative capacity of microorganisms as a method to degrade this type of waste, one of them being composting. This document presents a comparison of the composting technique with other treatment techniques used for this type of substance, comparing its efficiency in economic, technological, social and environmental perspectives, in addition to a compilation of experiences using this technique in this waste and its results with other experiences of biological treatments. After making this comparison and gathering information and experiences, it was possible to obtain better results in terms of efficiency and shorter treatment times by composting compared to other biological treatment techniques and their compliance with regulations. Also the bibliographic research allowed to identify composting, along with the other biological techniques, as the most viable alternative in terms of price, since it does not involve as much investment as thermal treatments or civil works, additionally it was concluded that biological treatment techniques are friendly in environmental and social issues due to the conditions they need for their application and their absence, generation of secondary pollution sources. In conclusion, it was possible to show that composting turned out to be the most appropriate technique in different aspects to be applied to the treatment of sediments from the bottoms of hydrocarbon tanks.

Keywords: Sediments, composting, efficiency, bioremediation

Indice

1	Capitulo I: Introducción	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Problemática	3
1.3	Justificación	4
1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo General:.....	5
1.4.2	Objetivos Específicos:	5
1.5	Alcance.....	5
2	Capitulo II: Bases teóricas	6
2.1	Características de los sedimentos fondos de tanques de hidrocarburos	6
2.1.1	Propiedades fisicoquímicas	6
2.1.2	Costos de gestión	8
2.2	Metodología convencionales de gestión y tratamiento de sedimentos.....	8
2.2.1	Metodologías	8
2.2.1.1	Encapsulamiento	8
2.2.1.2	Confinamiento	9
2.2.1.3	Incineración y pirolisis	9
2.2.1.4	Vidriado	9
2.3	Metodologías biológicas	10
2.3.1	Compostaje	10
2.3.2	Dinámica de las bacterias durante compostaje	12
2.3.3	Dinámica de las hongos durante compostaje	13
2.3.4	Dinámica de las actinomicetos durante compostaje	13
2.3.5	Operaciones unitarias del proceso de compostaje	14
2.3.5.1	Estabilización y acondicionamiento del residuo	14

2.3.5.2	Empleo de tamices moleculares.....	14
2.3.5.3	Empleo de materiales estructurantes	15
2.3.5.4	Empleo de cosustratos	15
2.3.6	Conformación de las pilas	16
2.3.7	Operaciones complementarias al compostaje	16
2.3.7.1	Bioaumentación.....	16
2.3.7.2	Bioestimulación	17
2.3.7.3	Hidratación	17
3	Capitulo II: Metodología	18
3.1	Recopilación bibliográfica.....	18
3.2	Recopilación de experiencias.....	19
3.3	Comparaciones	19
3.3.1	Comparaciones de tecnologías entre tratamientos biológicos (eficiencia y tiempos)	19
3.3.2	Comparaciones Económicas de costo unitario	19
3.3.3	Comparación con normativa	19
3.3.4	Justificación Social y Ambiental de la utilización de tecnologías biológicas frente a las físico/químicas.	20
4	Capitulo IV: Resultados y Discusión	20
4.1	Tabla recopilatoria de perspectivas de biorremediación	20
4.2	Comparación general	32
4.3	Perspectiva Tecnológica	34
4.4	Perspectiva Económica	36
4.5	Comparación con Normativa	37
4.6	Perspectiva ambiental	39
5	Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	40
5.1	Conclusiones.....	40

5.2	Recomendaciones.....	41
6	Referencias.....	42

1 Capítulo I: Introducción

1.1 Antecedentes

La contaminación por hidrocarburos representa una amenaza para la salud ambiental, debido a su movilidad en las matrices ambientales, suelo y cuerpos hídricos, con efectos devastadores sobre las propiedades fisicoquímicas del medio donde se desarrollan diferentes formas de vida (Olguín, Hernández, & Sánchez-Galván, 2007). La gama de hidrocarburos es muy variada, para cada uno de ellos se han encontrado usos específicos en las actividades productivas, sin embargo, existen hidrocarburos que constituyen residuos de alto poder contaminante, como es el caso de los sedimentos de fondos de tanques.

Los sedimentos de fondos de tanques, son un tipo especial de hidrocarburos que se generan en las actividades de transporte, almacenamiento, comercialización e industrialización de los hidrocarburos (Svet & Tsysar, 2018). Los sedimentos están formados en términos generales por, asfáltenos, arenas, naftenos y compuestos aromáticos recalcitrantes, metales pesados, arenas y óxidos (Hu, Li, & Zeng, 2013).

La composición de los sedimentos depende del tipo de hidrocarburos almacenado y de las condiciones de almacenamiento. Además de C, H, O, contienen nitrógeno y mínimas cantidades de azufre (Pedley, Hiley & Hancock, 1987). A manera de ilustración, en el estudio de biorremediación de sedimentos de combustibles en Shengli Oilfield, la caracterización mostró valores de pH de 7.3, humedad de 43.1% y una concentración de contaminantes de petróleo de 129 000 ppm TPHs (De-Qing et al., 2007).

La generación de sedimentos depende de la calidad del combustible o hidrocarburo almacenado (González, 2013) de su degradación en contacto con el aire (Pedley, Hiley & Hancock, 1988) y de la corrosión que ejercen sobre el material de los recipientes de almacenamiento (González, 2013). El mantenimiento y retiro periódico de estos sedimentos es necesario, para evitar la proliferación de microorganismos que deterioran las instalaciones y generan un incremento en el volumen de los sedimentos (Correa, 2018).

Los sedimentos se tratan usualmente por métodos tradicionales, como, incineración o pirolisis (Chang, Shie, Lin, Wu, Lee & Chang, 2000), técnicas que son de alto costo y ambientalmente no muy seguras debido a que se producen emisiones al ambiente, producto de operaciones incorrectas y combustión incompleta (México. Secretaría de Desarrollo Social, 2001). Otra alternativa de gestión es su confinamiento en rellenos o celdas de seguridad, en la práctica no constituye una solución definitiva, tan solo se aíslan los contaminantes por periodos prologados de tiempo (Llano, 2016), por otro lado, esta alternativa genera conflictos sociales con las comunidades ubicadas en las inmediaciones de estos emplazamientos de confinamiento. Adicionalmente es necesario asegurar que las condiciones de dichas instalaciones estén siempre en buen estado, debido a que dentro del confinamiento no existe un residuo estabilizado, por lo cual exigen un mantenimiento y control (Velásquez, 2018).

Una alternativa real para la gestión eficiente de este tipo de residuos es la biorremediación, biotecnología que se basa en la utilización de organismos vivos y sus capacidades metabólicas para degradar un contaminante y eliminar su efecto negativo sobre el ambiente (González, 2011). Los organismos empleados pueden ser autóctonos o introducidos para este propósito, tras ser cultivarlos en laboratorio (Speight & Arjoon, 2012).

La biorremediación ha demostrado ser efectiva con distintos tipos de contaminantes, incluyendo compuestos altamente peligrosos como creosotes, solventes clorados y fracciones pesadas de hidrocarburos, los productos finales de la degradación de estos compuestos son, agua y CO_2 , NO_3 , SO_4 , que son estables e inocuos para el ambiente. Comparativamente la biorremediación es más económica que la incineración (Alvarez & Illman, 2005).

Dentro de las técnicas de biorremediación existen algunas que pueden aplicarse a los sedimentos de hidrocarburos. Una de ellas es el compostaje en biopilas, técnica utilizada especialmente para remediar suelos contaminados con hidrocarburos (Martinez, Ferrera-Cerrato & Ortega, 2016). El compostaje en biopilas consiste en una técnica, cuya característica fundamental es el incremento de temperatura, gracias a las reacciones de degradación microbiana

que ocurren en su interior. Esto se logra agrupando grandes cantidades de material, denominados pilas, cuyo tamaño y dimensiones permiten el incremento de la temperatura, adicionalmente se debe garantizar el mantenimiento de ciertos parámetros fundamentales para el proceso, como son: oxígeno, humedad, relación Carbono/Nitrógeno y pH (Bueno & Cabrera, 2008).

El compostaje usualmente se lo ha usado durante muchos siglos para la transformación de materia orgánica en una enmienda conocida como compost. La materia orgánica empleada procede de residuos orgánicos de actividades agrícolas y de la industria alimenticia, sin embargo, esta metodología también ha mostrado eficiencia en el tratamiento de residuos hidrocarbúricos, así como también de solventes, explosivos, pesticidas, etc.) (Antonio & Lorena, 2003)

1.2 Problemática

Se estima que a partir de 500 toneladas de petróleo crudo procesado, se produce una tonelada de sedimentos (El Mahdi, Aziz, & Eqab, 2017), siendo un problema bastante grande para lugares donde la extracción y refinamiento de petróleo se realiza en grandes cantidades, especialmente en regiones petroleras como Sudamérica y el medio oriente.

Los sedimentos en calidad de hidrocarburos, han sido señalados como agentes contaminantes y tóxicos, que causan cambios en las propiedades físico-químicas del suelo, tales como la textura, porcentaje de materia orgánica, densidad real y la porosidad del mismo (Martínez & López, 2001). Adicionalmente, afectan el desarrollo de la vegetación de las zonas afectadas por liberación (Trujillo Toro & Ramírez, 2012), las más afectadas son las semillas en germinación y las plántulas que sufren de asfixia por impregnación con hidrocarburos y por la toxicidad asociada. De esta forma aún los árboles desarrollados, sufren daños en sus sistema radicular por acción de compuestos aromáticos de bajo peso molecular, dañan las membranas celulares de las raíces, impidiendo los procesos de adsorción de nutrientes con efectos negativos en toda la planta (Olguín, Hernández & Sánchez-Galván, 2007).

De igual forma los hidrocarburos afectan a la fauna y microorganismos, alterando la dinámica poblacional, generando, muerte, migración y pérdida de la biodiversidad (Pardo, Perdomo, & Benavides, 2017), efectos tóxicos, citotóxicos, mutagénicos y carcinogénicos (Eisler, 1987). Las afectaciones influyen a la sociedad, debido a que presentan afectaciones a la salud de los habitantes (Nicoletti, Arcuri, Nicoletti & Bruno, 2015) y a su vez teniendo un impacto negativo sobre actividades productivas, con impactos socio-económicos (Fingas, 2015)

Ligado a los efectos de la contaminación, está la falta de metodologías eficientes, seguras y de bajo costo de tratamiento de sedimentos y fondos de tanques de combustibles, que motivan su acumulación continua, la búsqueda constante de sitios para su almacenamiento seguro y por ende los riesgos asociados a su acumulación (Vallejo, Salgado, Roldan, 2005). Las metodologías tradicionales de tratamiento como la incineración o pirólisis (Chang et al., 2000), generan emisiones peligrosas para el ambiente (México. Secretaría de Desarrollo Social., 2001). La alternativa de confinamiento, que en la práctica no es una técnica de tratamiento definitivo, sino un paliativo que pretende ganar tiempo, hasta encontrar una verdadera solución (Llano Zapata, 2016). Ambos métodos son significativamente costosos e involucran mucha tecnología para su implementación y mantenimiento (Velásquez, 2018).

Frente a las técnicas convencionales se han implementado técnicas alternativas como la biorremediación, tales como landfarming, compostaje y fitorremediación, sin embargo, no se conoce la eficiencia real de estas técnicas en el tratamiento de fondos de tanques de almacenamiento de combustibles (sedimentos), y por ende, las perspectivas de desarrollo ulterior, en programas de tratamiento masivo que resuelvan en forma definitiva el problema de la acumulación continua de este tipo de residuos hidrocarburíferos.

1.3 Justificación

La presente investigación se justifica socialmente, por cuanto permite reducir la tensión social generada por el emplazamiento de sitios de almacenamiento o tratamiento convencional de este tipo de residuos en las inmediaciones de los centros poblados, identificando una tecnología eficiente, amigable con el

ambiente como el compostaje, que puede constituirse en una solución al problema asociado a los fondos de tanque.

La identificación de una tecnología de tratamiento alternativa de alto rendimiento constituye una ventaja económica, no solo porque sus costos de ejecución son menores a las técnicas convencionales (Tangri, 2005), sino también porque genera plazas de trabajo en las comunidades cercanas que carecen de fuentes de empleo. Un sistema de biorremediación resulta económicamente más viable puesto a que los costos de implementación son mucho más bajos, en cuanto a tecnología, materiales y transporte (Garzón, Rodríguez, & Hernández, 2017).

La gran cantidad de información referente a técnicas de remediación de lodos y sedimentos hidrocarburíferos nos muestra en mayor o menor medida que las técnicas tradicionalmente implementadas presentan resultados relativamente satisfactorios, con elevados costos operativos y frecuentemente acompañados de procesos de contaminación secundaria. En tal virtud la búsqueda de información referente al empleo de técnicas de biorremediación como el compostaje podría servir de base para generar programas de remediación eficiente de bajo costo y con sostenibilidad ambiental.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General:

Evaluar la eficiencia del compostaje en la remediación de sedimentos de fondo de tanques de hidrocarburos frente a otras técnicas de tratamiento.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Realizar una comparación de los costos de operación de los tratamientos fisicoquímicos y biológicos y del compostaje.
- Justificar el uso de técnicas biológicas de remediación en base a preferencias sociales e impactos ambientales.

1.5 Alcance

La presente investigación realizó un profundo y extensivo análisis bibliográfico de artículos científicos, libros, informes experimentales y tesis a nivel mundial,

sobre el empleo del compostaje en la biorremediación de sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos. La información permitió conocer las perspectivas de desarrollo de esta metodología como una técnica eficiente en el tratamiento de estos residuos. Adicionalmente identificó la mejor alternativa de este tratamiento para estos residuos en el país.

2 Capítulo II: Bases teóricas

Para esta investigación se utilizó el termino lodo (sludge) igual a sedimento, puesto a que ambos corresponden al mismo residuo tanto en la redacción como información bibliográfica (Ubani, Atagana & Thantsha, 2013).

2.1 Características de los sedimentos fondos de tanques de hidrocarburos

2.1.1 Propiedades fisicoquímicas

Los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos son uno de los varios tipos de lodos de petróleo que se pueden encontrar en los procesos de extracción y refinamiento de petróleo. Estos suelen ser formados por emulsiones W/O de agua, solidos (arena, arcillas, óxidos, etc.), TPHs y metales pesados (Hu et al., 2013), en cuanto a la cantidad de cada uno de estos es muy variada, ya que los sedimentos varían dependiendo de la calidad del hidrocarburos almacenado y las condiciones ambientales a las cuales está expuesto. Según (Svet & Tsysar, 2018) sus partes pueden encontrarse en estos rangos: hidrocarburos 5-90%, agua 1-52% e impurezas solidas 0.8-65%. Es debido a esto que las condiciones fisicoquímicas de los sedimentos tienden a variar bastante, en cuanto a sus valores de densidad encontramos en valores entre 830 y 1700 kg/m³.

Con frecuencia los sedimentos poseen pequeñas capas que se diferencian entre ellas en cuanto a la concentraciones de hidrocarburos y su tipo de emulsión, normalmente son de cuatro tipos: La primera capa, cuya característica depende del hidrocarburo que se encontraba almacenado originalmente. La segunda capa, compuesta por una mezcla de agua e impurezas, donde el agua llega a un porcentaje de 70 a 80% y con un 1.5 a 15% de impurezas (Vdovenko, Boichenko,

& Kochubei, 2015). La tercera capa está compuesta en su totalidad por agua mineralizada asentada, con una densidad cercana al a 1.01 a 1.19 g/cm³. Finalmente la última capa, la más cercana al fondo del tanque consiste en una estructura sólida casi en su totalidad, teniendo hasta 45% de componentes orgánicos y entre 52 a 88% de impurezas metálicas (metales pesados), adicionalmente hasta 25 % de agua (Svet & Tsysar', 2018).

En cuanto al pH los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos tienden a tener valores entre 6,5 a 7,5, la variación de la composición de los sedimentos explica el rango de pH observado (Hu et al., 2013). Los valores de densidad y viscosidad del sedimento, varia en rango de: 950 a 985 kg/m³ y 800 a 1800 mPa s, respectivamente (Svet & Tsysar', 2018).

En cuanto a la composición de los sedimentos fondos de tanque de hidrocarburos, podemos encontrar gran cantidad de compuestos como el criseno, naftaleno, fenantreno y 1-metil naftaleno, así mismo la EPA caracterizó a estos residuos encontrando la siguiente composición de hidrocarburos: naftaleno, fenantreno, fluoreno y criseno (Bojes & Pope, 2007).

Los sedimentos de fondos de tanques se generan durante los procesos posteriores a la extracción del petróleo, transporte, refinamiento y almacenamiento. Se estima que a partir de 500 toneladas de petróleo crudo procesado, se produce una tonelada de sedimentos (El Mahdi et al., 2017). En USA se registra que cada refinería genera cerca de 30 000 toneladas anuales de sedimentos o lodos resultante de todos los procesos (Hu et al., 2013). Según (Cerqueira et al., 2011) las refinerías en Brasil puede llegar a generar 10 000 metros cúbicos de sedimentos anualmente con una producción de 200 a 500 barriles diarios.

Según (Aimin Li, 2015) en China se producen 800 toneladas anuales de sedimentos, mientras que en Pakistán se registra en promedio una generación de cerca de 55 toneladas anuales (Mahar et al., 2016). Esto nos confirma que el volumen de generación de sedimentos depende de la calidad del hidrocarburo almacenado y las condiciones ambientales a las que está expuesto.

2.1.2 Costos de gestión

Existen diversos costos en cuanto a la gestión de los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos, estos dependen la composición de los sedimentos, del método de gestión utilizado y el tiempo de tratamiento (Hamoda, Hamam, & Shaban, 1989).

Estudios de métodos físicos de tratamiento realizados en Rusia muestran que el costo de metro cubico de sedimentos y lodos corresponde a 500 rublos, equivalente a 6,64 dólares estadounidenses (Chukhareva, Korotchenko, & Yurkin, 2015).

Además en el artículo (Islam, 2015) se menciona que el uso de tratamientos convencionales como ultrasónico, extracción de solventes, pirolisis e incineración resultan en costos demasiado elevados en comparación con técnicas de biorremediación y biodegradación.

2.2 Metodología convencionales de gestión y tratamiento de sedimentos

2.2.1 Metodologías

2.2.1.1 Encapsulamiento

El encapsulamiento es un proceso en el cual el contaminante es incorporado dentro de la matriz de un material capaz de incorporarlo en su estructura (Cullinane, Jones, & Malone, 1986).

Artículos como (Billings, 1997) muestran como esta técnica aplicada al tratamiento de hidrocarburos (sólidos, líquidos, lodos, etc.) distribuidos en una superficie de cemento, con meta silicatos de sodio, fue efectiva. Experimentos realizados en el Ecuador, han utilizado este método para tratar lodos provenientes de lavadoras y lubricadoras, con resultados que no permitieron cumplir con los límites permisibles de concentración de la normativa ambiental luego del tratamiento (Salazar, 2018).

Varias fuentes mencionan que esta técnica es bastante rápida y no necesita de un lugar especial de tratamiento, creando polímeros bastante resistentes,

manteniendo sus componentes confinados hasta que alguna reacción fuerte los libere (Noïk, Malot, Dalmazzone, & Mouret, 2004).

Uno de los materiales con mayor eficiencia en el proceso de encapsulación son las zeolitas teniendo varias ventajas frente a otros materiales como una encapsulación más duradera, una mayor capacidad de absorción y la capacidad de obtener mayor variedad de productos resultantes de la reacción química (Walspurger & Sommer, 2010).

2.2.1.2 Confinamiento

El confinamiento de contaminantes se trata de la utilización estructuras y obras civiles bajo tierra como una técnica para mantener inmovilizados contaminantes ambientales (Llano, 2016). Esta técnica ha sido utilizada para el confinamiento de residuos de hidrocarburos, desarrollando sistemas bastante elaborados para su correcto almacenamiento (Newman, 2006).

2.2.1.3 Incineración y pirolisis

Esta técnica usa el poder calorífico de los sedimentos, que facilita su destrucción en el proceso combustión con temperaturas muy altas, llegando incluso a 1200 °C (Ossai, Ahmed, Hassan, & Hamid, 2020).

Muchos de los sedimentos tienen componentes resistentes a la combustión, razón por la que no se degradan correctamente (Suganya, Sivapragasam, Sharma, & Vanitha, 2019). Los costos de incineración una tonelada métrica de residuos varía entre 150 a 2900USD, en tanto que los costos de pirolisis estarían entre 70 a 460USD, por tonelada métrica (Vidonish et al., 2016) con una eficiencia del <99% (Ossai et al., 2020).

2.2.1.4 Vidriado

La técnica del vidriado consiste en la utilización de altas temperaturas, normalmente entre 1600 a 2000 grados centígrados, con el objetivo de mantener contaminantes inmovilizados dentro de materiales vitreos como vidrio solido o cristales. Adicionalmente esta técnica también facilita un proceso de combustión y de pirolisis por las altas temperaturas (Ossai et al., 2020). Los procesos de

vitrificación/vitrificación tiene un alto costo, debido al alto consumo energético, típico de los procesos relacionados al uso de altas temperaturas. A manera de ejemplo una tonelada métrica de material tratado por esta técnica tiene un costo que varía entre 486 a 2900 USD, valor que es extremadamente caro, en especial si el volumen a tratar es elevado (Vidonish et al., 2016).

En cuanto a esta metodología no se encontraron estudios que muestren su ejecución en el Ecuador.

2.3 Metodologías biológicas

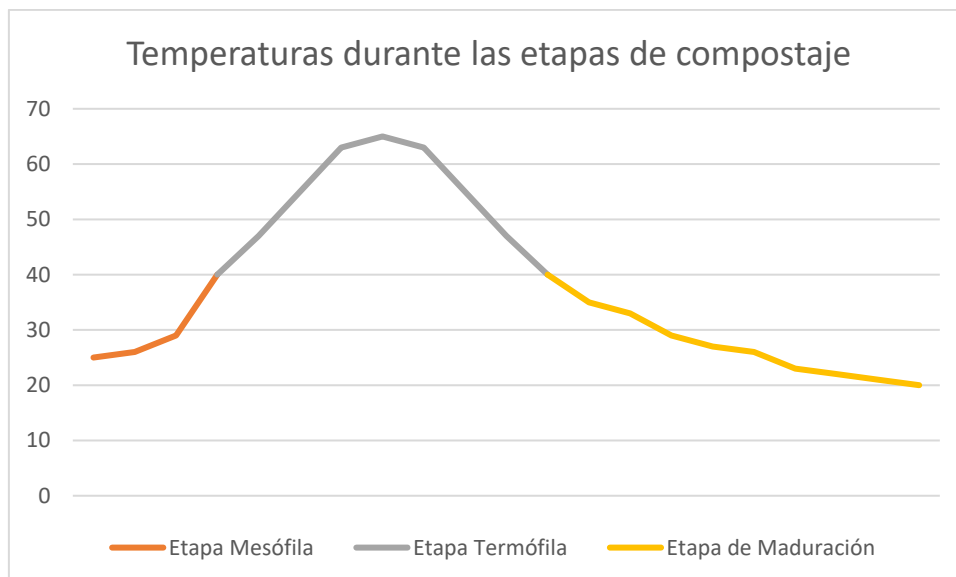
2.3.1 Compostaje

El compostaje es una técnica de biorremediación, cuya característica fundamental es el incremento de temperatura que se genera gracias a las reacciones de degradación microbiana que liberan la energía contenida en los residuos sujetos a degradación (Cochran & Carney, 1996). El compostaje frecuentemente se lo realiza conformando pilas (camas o lechos) cuyas dimensiones permiten su fácil manipulación si se lo ejecuta manualmente y la conservación del calor en un método de disminución de un contaminante (Malwana, Weerasinghe, & Pilapitiya, 2013).

Como es lógico de esperar en el compostaje también se deben controlar parámetros fundamentales para el proceso, como son: oxígeno, humedad, relación Carbono/Nitrógeno y pH (Epstein, 2011), se debe dar aireación constante a la pila para evitar condiciones de falta de oxígeno (Pedro Bueno & Cabrera, 2008). Esto es indispensable ya que permitirá formar una idea de en qué momento del proceso nos encontramos y si existe algún problema en el tratamiento (Prieto, 2015).

El compostaje usualmente se lo ha usado durante muchos siglos para la transformación de materia orgánica en una enmienda conocida como compost. La materia orgánica empleada procede de residuos orgánicos provenientes de actividades agrícolas y de la industria alimenticia, sin embargo, esta metodología también ha mostrado eficiencia en el tratamiento de residuos hidrocarbúricos, así como solventes, explosivos, pesticidas, etc.) (Antonio & Lorena, 2003)

El compostaje presenta etapas durante las cuales el pH la temperatura y la dinámica de crecimiento microbiana, experimentan variaciones que determinan la eficiencia del proceso de degradación.



Grafica 1 Temperaturas durante las etapas de compostaje

Las etapas del compostaje convencional se producen en el transcurso de un mes tal como se puede observar en Grafica 1 sin embargo, para la degradación de sedimentos de hidrocarburos mediante esta técnica las etapas del proceso se prolongan en el tiempo, en especial la etapa termófila que presenta variaciones no sustanciales gracias al control irrestricto de los parámetros de proceso y la adición oportuna de nutrientes que permiten la reactivación de la actividad microbiana y por ende la generación de calor.

En el compostaje de residuos hidrocarbúricos comienza con la etapa mesófila, donde esta puede variar entre 5-8 días hasta 2 - 3 semanas, dependiendo de la calidad de la mezcla sujeta a compostaje y las condiciones generadas en las pilas (Roman, Martínez, & Pantoja, 2015). Inicia a un valor de temperatura que corresponde a la ambiental y en el transcurso del período de tiempo antes mencionado se incrementa hasta llegar a su valor máximo de 40°C (Sundberg, Smårs & Jönsson, 2004). A partir del 4-5 día inicia su incremento hasta un valor

alcalino, cuando la temperatura alcanza su valor máximo (Sundberg et al., 2004) dando inicio con la etapa termófila, la cual es primordial mantenerla durante un tiempo prolongado, esta duración depende de la velocidad de la reducción de la concentración del contaminante. Es importante ejecutar operaciones de bioestimulación (N, P, K), con el propósito de reactivar la actividad microbiana, por cuanto el "C", es abundante, pero los nutrientes N, P, K, son limitantes (H. Wang et al., 2018), permitiendo temperaturas entre 45-60°C, estos valores de temperatura garantizan una buena tasa de degradación de los contaminantes (Antonio & Lorena, 2003). En los sistemas de compostaje convencional de materia orgánica seleccionada para la obtención de abonos, en esta ocurre la eliminación de los organismos infecciosos agentes causales de enfermedades en cultivos (Gómez, 2006). Continuando con la etapa de maduración, la cual señala el final del proceso de compostaje y la evacuación de los materiales tratados, para su disposición final, en conformidad con la planificación de la empresa operadora (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino & Amigos de la tierra, 2010) .

2.3.2 Dinámica de las bacterias durante compostaje

Las bacterias son parte esencial del proceso de compostaje, estando presentes a lo largo de todas las etapas. Al inicio del proceso es cuando existen la mayor cantidad de nutrientes y las condiciones de relación NPK. A medida que avanza la etapa de activación, la temperatura sube en tanto que la población bacteriana alcanza su pico a inicios de la etapa termófila del proceso, mediante bioestimulación periódica con NPK, que activa el metabolismo microbiano y produce el calor necesario para el proceso (Mesas & Alegre, 2011). Con la etapa termófila empieza a existir abundancia comunidades bacterianas termófilas y organismos patógenos comienzan a desaparecer (Roman et al., 2015) siendo esta donde se generan los procesos de degradación. Con la etapa de maduración, donde estas apoyarán el trabajo de transformación (humificación) de las fracciones residuales contaminantes en y su transformación en compuestos inocuos (Villar et al., 2016).

2.3.3 Dinámica de las hongos durante compostaje

Los hongos experimentan un comportamiento similar a las bacterias. Sin embargo, en la etapa de enfriamiento, el descenso de la población de hongos es más sensible en comparación con la población bacteriana, por cuanto estos son organismos que presenta una mayor capacidad para degradar estructuras poliméricas complejas como son los HAPs, en tanto que las bacterias, son especializadas en fracciones menos pesadas y de poca complejidad (Rodríguez, 2003). Los hongos son capaces de facilitar y disminuir el tiempo y eficiencia de tratamiento (Gaur, Sadasivam, Mathur, & Magu, 1982).

En la etapa de maduración tendrán un rol protagónico (Tiquia et al., 2002), inclusive llegando a ser responsables de la degradación de los materiales más resistentes durante el proceso de maduración, conjuntamente con los actinomicetos (Raut, Prince William, Bhattacharyya, Chakrabarti, & Devotta, 2008).

2.3.4 Dinámica de las actinomicetos durante compostaje

La población de actinomicetos inicial es sustancialmente baja en comparación con los hongos y bacterias, su nivel es equivalente a la población ecológica (Mesas & Alegre, 2011). Su número crece a medida que transcurre la etapa de activación y a diferencia de los dos anteriores, su crecimiento máximo coincide con la etapa de maduración del compostaje (Klamer & Bååth, 1998). Para el caso del compostaje de lodos aceitosos, su población se mantiene alta mientras se mantengan las condiciones de elevada temperatura (Recer, Browne, Horn, Hill, & Boehler, 2001), algo que se logra mediante bioestimulación periódica (Shahsavari, Adetutu, & Ball, 2016) aumentando la biomasa (Raut et al., 2008). Los actinomicetos acompañados de los hongos durante la etapa final del compostaje, son los responsables de la transformación, reorganización y polimerización de componentes residuales resistentes a degradación (Tiquia et al., 2002).

2.3.5 Operaciones unitarias del proceso de compostaje

2.3.5.1 Estabilización y acondicionamiento del residuo

Los procesos de estabilización cumplen un rol importante dentro de la biorremediación, puesto a que estos corresponden a un proceso de adecuación del residuo para inmovilizar sus componentes y volverlo inerte, es decir que facilita el tratamiento del residuo, evitando que sus diferentes componentes se transfieran a otras matrices ambientales como puede ser el agua o el aire (López, 2002). Estos procesos facilitan la biorremediación, por cuanto los inmovilizan y los hidratan haciéndolos disponibles para los microorganismos (Hills, 2015). En el proceso de estabilización se utilizan materiales estructurantes y tamices moleculares, como las zeolitas, y bentonitas para acondicionar al residuo a mejores los parámetros de tratamiento (Shi, 2013).

2.3.5.2 Empleo de tamices moleculares

Los tamices moleculares son materiales altamente porosos y con un área de contacto bastante elevada, normalmente se tratan de materiales aluminosilicatos tales como las zeolitas, que poseen propiedades específicas tales como adsorción de gases, estabilización de contaminantes que los hacen útiles para el proceso de estabilización de contaminantes previo a un tratamiento biológico (Szostak, 1989). Los contaminantes participan en proceso de adsorción, absorción o intercambio iónico y quelación (Umaña, 2002). Los tamices moleculares poseen una porosidad específica, que retienen contaminantes facilitando su biodegradación (Agwaramgbo, Magee, Nunez, & Mitt, 2013). Es necesario recordar que entre las condiciones para que una sustancia contaminante sea degradada, se deben cumplir con tres condiciones, primero; que esté en solución, segunda, que este inmovilizada y tercera; que tenga afinidad estructura con la enzima microbiana (Nelson & Cox, 2014).

Tamices moleculares como las zeolitas tienen la capacidad equilibrar el pH (Miller et al., 1996) evitando cambios bruscos durante el tratamiento, y aislando mediante adsorción a metales pesados que son tóxicos para los microorganismos (Burlakovs, Klavins, & Karklina, 2013). Otros tipos de tamices

moleculares comúnmente empleados son: bentonitas, arcillas, carbones minerales, margas, puzolanas (Karge & Geidel, 2004).

2.3.5.3 Empleo de materiales estructurantes

En calidad de materiales estructurantes se emplean materiales ligno celulósicos, que son productos de rechazo de otras actividades productivas de fácil acceso y de bajo costo, en especial de las actividades agrícolas (García, Carmen, & López, 2012), el material estructurante estimula la formación de la biopelícula (sobre la superficie de adhesión), participa en reacciones de absorción, adsorción e intercambio, gracias a su naturaleza polimérica (Alfaro, 2007). Investigaciones de biorremediación destacan la acción de los materiales estructurantes como un factor altamente determinante en cuanto a eficiencia del tratamiento (Anza Cruz et al., 2016), gracias a que facilitan la aereación (El Mahdi et al., 2017)..

La EPA señala el uso de astillas de madera, aserrín, paja, heno y estiércol animal en calidad de materia (EPA, 2014). Como se puede notar, la mayoría de los materiales están compuestos de materia orgánica, favoreciendo en este aspecto a la mezcla (Hu et al., 2013).

2.3.5.4 Empleo de cosustratos

Los cosustrato son sustancias con afinidad estructural o comportamiento químico cercano a los contaminantes que son el principal objetivo del tratamiento de biorremediación, facilita el proceso de degradación de contaminantes, en muchos casos; en ausencia de estos el proceso puede no iniciarse (Hadibarata & Kristanti, 2012). Ejemplos de este material son glucosa, levadura, etanol, metanol, piruvato, acetato (Fernández, 2012). El empleo de cosustratos puede contribuir al balance de nutrientes (Liu, Zhang, Dong, Wu, & Wang, 2017), mediante el impulso de las comunidades bacterianas (Zhang & Lo, 2015 & Shanshan Wang et al., 2012).

Los cosustratos, no son la fuente principal de carbono, por ello su cantidad es limitada, tan solo para actuar como estimulante del proceso de biodegradación (Piazzese et al., 2018).

2.3.6 Conformación de las pilas

Las dimensiones de las pilas dependen de la cantidad de material que se va a compostar y de las condiciones climáticas, se recomienda por lo general utilizar dimensiones entre 1 a 1.5 metros de alto y de 1 a 2 metros de ancho (Roman, Martinez, & Pantoja, 2015) y asegurar las condiciones iniciales (Bueno & Cabrera, 2008). Es importante tener una porosidad adecuada, razón por la que se recomienda disponer de un equipo de trituración de materiales (Andalucía Luz, 2000).

Los factores que afectan las dimensiones de las pilas son los materiales que son parte de la mezcla a compostar, la forma de aireación y la disponibilidad de espacio para colocar las pilas (Docampo, 2013).

2.3.7 Operaciones complementarias al compostaje

En el proceso de tratamiento biológico es necesario implementar estrategias que contribuyen a acortar el tiempo de tratamiento y mejorar la calidad del proceso, como son la Bioestimulación y la bioaumentación Industrial (Epstein, 2011).

2.3.7.1 Bioaumentación

La bioaumentación es una actividades bastante común en proceso de biorremediación, esta implica la implementación de un aditivo que contiene microorganismos propios del medio o ajenos (Zawierucha & Grzegorz, 2014), esto con el objetivo de acelerar y mejorar el proceso de biorremediación (Cerqueira et al., 2011).

La bioaumentación puede ejecutarse mediante inyección de un fluido microbiano, introducción de microorganismos inmovilizados e introducción de microorganismos encapsulados.

a. Inyección líquida

Un consorcio microbiano, reproducido en un medio nutritivo de bajo costo es introducido a las pilas con ayuda de un sistema de riego, aspersión o goteo, por bombeo o por gravedad (Silva & Alvarez, 2010)

b. Inmovilización luego inyección

Los microorganismos se impregnan con materiales porosos como carbón, arcilla, lignito o turba, que actúan como portadores; antes de mezclar con el material a Biorremediar, el material funciona como un refugio y alimento temporal para los microorganismos (Gentry, Rensing, & Pepper, 2004).

c. Encapsulación luego inyección

En calidad de materiales encapsulantes pueden ser usados agar, alginato, poliuretano o cerámica porosa, tomando la labor de formaciones permeables que protegen de los efectos tóxicos de los contaminantes a los microorganismo bioaumentados, además de facilitar la difusión de gases y líquidos (Moslemy, Guiot, & Neufeld, 2002).

2.3.7.2 Bioestimulación

Esta es otra estrategia que permite mejorar los procesos de biorremediación, mediante el cambio de las condiciones micro ambientales de tratamiento, como el pH, temperatura, humedad, oxígeno. La forma más eficiente y frecuente, es la adición de fuentes de nutrientes, en especial N, P, K y microelementos, que activan a los sistemas fermentativos microbianos (Adams, Fufeyin, Okoro, & Ehinomen, 2015).

La frecuencia de bioestimulación depende del contaminante a tratar, por lo cual es necesario tener un registro de temperaturas de las pilas, ya que esto permitiría saber cuándo existe un déficit de nutrientes en la mezcla, esto disminuye la actividad microbiana y por consiguiente la temperatura, la idea es mantener la temperatura alta el mayor tiempo posible.

2.3.7.3 Hidratación

El proceso de hidratación de las pilas, debe ejecutarse con ayuda de sistema de aspersión, goteo, microaspersión, en tal forma que la humedad relativa de las pilas alcance valores entre 40 y 60%, la medición se ejecuta con el equipo de

retorta portátil o un tensiómetro empleado en labores agrícolas (Junta de Andalucía, 2013). Una alternativa de hidratación de las pilas de compostaje es la entrada constante de aire húmedo mediante aireadores o con un sistema de riego por aspersores o mangueras (Epstein, 2011).

3 Capítulo II: Metodología

3.1 Recopilación bibliográfica

La metodología utilizada para la elaboración de este trabajo de titulación consistió en una recopilación de información bibliográfica acerca de los sedimentos fondos de tanques de hidrocarburos a modo review y de las técnicas de tratamiento de este tipo de residuos, haciendo un especial énfasis en el compostaje debido a su importancia como técnica central de este trabajo. Posteriormente se realizó un análisis comparativo entre las técnicas de tratamiento.

Dicha información fue obtenida a partir de fuentes digitales, especialmente de artículos científicos, libros científicos, guías técnicas, tesis y reviews. Dicha información fue encontrada a partir de páginas especializadas en indagación bibliográfica como lo son Google Académico y Library Genesis, adicionalmente se utilizaron editoriales científicas que funcionan como repositorios de artículos científicos como lo son Springer, Elsevier, Taylor & Francis, Reasearch Gate, SciELO, entre otros. Se dio uso de artículos entre los años 1979 hasta la fecha actual. El método de investigación de la información consistió en buscar palabras claves o frases acerca de los temas tratados tanto en inglés como en español.

Se buscó información relevante a los temas, datos acerca de los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos, así como, de las técnicas de tratamiento: en qué consisten, cuáles son sus características y sus precios de aplicación. Posteriormente se realizó una recopilación de experiencias del uso de las técnicas biológicas de tratamiento, aplicándolas a los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos.

3.2 Recopilación de experiencias

Una vez recopilada la información respecto a los sedimentos se buscaron casos de estudio de tratamiento de estos mediante métodos biológicos. Con dicha información se buscó elaborar una tabla recopilatoria de experiencias de biorremediación lo que permitirá evaluar la eficiencia del compostaje como metodología apropiada para el tratamiento de estos, de igual manera se evaluará los tiempos de tratamiento.

3.3 Comparaciones

3.3.1 Comparaciones de tecnologías entre tratamientos biológicos (eficiencia y tiempos)

Con la información de experiencias de la tabla anterior se establecieron agrupaciones, siendo estas el landfarming y fitorremediación de manera individual y en el caso del compostaje como se trató de la técnica con mayor cantidad de artículos y variables de concentración inicial de TPHs, se dividió en 4 categorías en base a la concentración de TPHs, siendo estas: >100 000 ppm, entre 100 000 y 50 000, entre 50 000 y 10 000 y finalmente <10 000.

3.3.2 Comparaciones Económicas de costo unitario

De igual manera se compararon el precio de aplicación de técnicas biológicas y convencionales para evaluar, mediante una recopilación de precios unitarios y formulando una tabla, esto permitió evaluar al tratamiento de manera general en el aspecto económico y en base a eso concluir si corresponde su aplicación al residuo en cuestión.

3.3.3 Comparación con normativa

La tabla recopilatoria de experiencias de biorremediación permitió identificar las concentraciones finales de TPHs de cada una de ellas. Este dato se comparó con los límites máximos permisibles correspondientes al Reglamento Ambiental de Operaciones Hidrocarburíferas 2019, específicamente con la tabla 6 correspondiente a Límites permisibles para la identificación y remediación de

suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluidas las estaciones de servicios, verificando si estos cumplen los límites máximos de TPHs con los tres parámetros competentes los cuales son: <4000 correspondiente a suelo de uso industrial, <2500 para suelo de uso agrícola y <1000 correspondiente para ecosistemas sensibles.

3.3.4 Justificación Social y Ambiental de la utilización de tecnologías biológicas frente a las físico/químicas.

Así mismo se estableció una comparación en aspectos sociales y ambientales lo que permitirá identificar si el compostaje resulta más ventajoso que otros tipos de tecnologías de tratamiento. Mediante las consultas bibliográficas se buscó información que respalde su uso y ventajas frente a metodologías convencionales.

En base a los análisis anteriormente mencionados se establecerá si el compostaje es la técnica adecuada para tratar a este residuo en diferentes aspectos indispensables de considerar.

4 Capítulo IV: Resultados y Discusión

4.1 Tabla recopilatoria de perspectivas de biorremediación

Las concentraciones iniciales corresponden a la concentración de la mezcla de sedimentos con materiales estructurantes, o en su defecto la concentración al inicio de la experimentación.

Tabla 1 Recopilación de perspectivas de usos de biorremediación

Técnica de tratamiento	Eficiencia de remoción de TPH	Tiempo de tratamiento	Características de la experiencia	Concentración Inicial de TPH	Referencia bibliográfica
Landfarming	80%	9 meses	El trabajo fue realizado en condiciones	No se menciona	(Prado, Correa, Rodrigue

			temperatura de 25-27°C y con precipitación constante. A los sedimentos se los sometió a irrigación, aireación, fertilización y a inoculación bacteriana. La eficiencia se atribuye a las condiciones climáticas.		z, & Carneiro, 1993)
25.75 %	11 meses		El experimento se elaboró en campo abierto, permitiendo que el lugar de investigación se cubra con plantas herbáceas. Se mezclaron los sedimentos con suelo, fertilizante y se agregó un inóculo para aumentar la actividad microbiana.	47 000 ppm	(Genouw et al., 1994)
90.04 %	3 años		El lugar de experimentación tenía una temperatura promedio de 12.8°C y precipitación alta. Los sedimentos se	12 570 ppm	(Shijie Wang, Wang, Zhang, Li, & Guo, 2016)

			mezclaron con tallos de algodón y con suelo, se mantuvo una humedad entre 20-40%. Se atribuyo la eficiencia al uso de enmiendas orgánicas como los tallos de algodón y la labranza del terreno.		
	80%	11 meses	El ambiente de trabajo era semiárido con temperaturas de 19°C y baja precipitación. El tratamiento consistió en mezclar los sedimentos con la capa superior de suelo donde fueron tendidos y realizara arado 1 vez a la semana, este tratamiento se completó con aireación, sin la adición de agua o nutrientes.	9 720 ppm	(Marin, Hernandez, & Garcia, 2005)
Fitorremediación	70%	120 días	Se aplico en un lugar con temperaturas de 20-24°C. Se utilizaron dos especies de	38 460 ppm	(Muratova, Bondarenkova,

			plantas, <i>Secale cereale</i> L. y <i>Medicago sativa</i> L., se mezclaron los sedimentos en la tierra y se aplicó fertilizante nitrogenado.		Panchenko, & Turkovskaya, 2010)
72.8%	90 días		La metodología de trabajo se basó en trabajo de mesocosmos. Se aplicó la planta <i>Vetiveria zizanioides</i> , con agente estructurante nutrientes y un consorcio microbiano. Se atribuyó la eficiencia a los nutrientes y el efecto en conjunto de la planta con el consorcio.	31 150ppm	(Nanekar, Dhote, Kashyap, Singh, & Juwarkar, 2015)
57.38 %	4 meses		Se presentaron temperaturas de 22.28°C y con baja precipitación. Se mezcló sedimentos previamente tratados con landfarming con suelo, posteriormente	27 647 ppm	(Ramirez & Dussan, 2014)

			se utilizaron plantas de frijoles en este estudio.		
52%	3 años	Se mezclaron los sedimentos con el suelo donde se iba a realizar el experimento, siendo el centeno la planta que facilito la fitorremediación.	15 600 ppm	(Muratova , Dmitrieva, Panchenko, & Turkovskaya, 2008)	
18%	100 días	Se aplico esta experimentación en suelo mezclado con sedimentos, a la mezcla se le garantizo la humedad del 70% durante todo el proceso y la planta que obtuvo esa eficiencia fue <i>Medicago falcata L.</i>	5000 ppm	(Panchenko, Muratova, & Turkovskaya, 2017)	
70.82 %	15 semanas	El experimento se realizó a escala laboratorio. Se realizo una mezcla de los sedimentos con suelo y agregando un inculo de bacterias que facilitara el trabajo de hongos	160 000 ppm	(Rossiana , Joko, & Yayat, 2018)	

			utilizados en el experimento.		
Compostaje	55%	32 días	Esta experimentación se realizó a mediana escala, utilizando una estructura especializada para contener al compost, al cual es resultado de una mezcla de materiales estructurantes de origen biológico y los sedimentos, además se agregó un inóculo de <i>Pseudomona putida</i> a quien se le atribuyo la eficiencia.	50 000 ppm	(Milne et al., 1998)
	60%	3 meses	En esta experimentación se realizaron pilas de 2 m ³ elaborados por una mezcla de aserrines, estiércol de cerdo y los sedimentos. La eficiencia se la vínculo con el uso adecuado de materiales estructurantes para	93 600	(Marín et al., 2006)

			promover la aeración de la pila.		
62.1%	3 meses	Se realizó la experimentación en cajas composteras de 1m ³ de volumen. La mezcla para compostar fue el resultado de unir residuos vegetales con los sedimentos.	118 680 ppm	(Fountoulakis et al., 2009)	
80%	10 semanas	Esta experimentación se realizó en pilas por ventilación forzada. Se mezclaron los sedimentos con compost no maduro en diferentes relaciones, la mejor eficiencia fue atribuida a las mezclas con mayor cantidad de compost (1/8).	13 037 ppm	(Ali Koolivand , Naddafi, Nabizadeh, Nasser, Jafari, Yunesian, Yaghmaei an, et al., 2013)	
89%	11 meses	Esta experimentación se la realizo bajo condiciones de laboratorio, se mezcló los sedimentos con suelo y diferentes tipos de estiércol para	<1000 ppm	(Ubani, 2012)	

			aumentar la actividad bacteriana.		
93%	4.5 meses	En esta investigación se una mezcla con estiércol de caballo, con un pretratamiento de deshidratación de los sedimentos. Es importante mencionar que para este trabajo se utilizó cerca de 960 m ³ de sedimentos.	10 000 ppm	(Sarika Saxena, 2015)	
31%	56 días	En este trabajo se comparó el tratamiento de compostaje con Bioaumentación y sin él, en la primera variante se mezclaron a los sedimentos con aserrines y estiércol de animal, en la segunda, el sedimento puro	101 400 ppm	(Ouyang et al., 2005)	
49.62 %	220 días	En este trabajo se utilizó efecto de la bioestimulación en un proceso de compostaje por biopilas, adicionando	58 300 ppm	(X. Wang et al., 2012)	

			agentes estructurantes y nutrientes a la mezcla.		
68.7%	370 días	Se implemento el compostaje de cerca de 28 m ³ de sedimentos. fue realizada con sedimentos y varios tipos de compost, abonos y enmiendas orgánicas. Se adjudico la eficiencia a la temperatura que alcanzo a la pila y a la aireación.	15 000 ppm	(Kriipsalu & Nammari, 2010)	
79.9%	10 semanas	La experimentación realizada en Irán consistió en realizar una mezcla entre los sedimentos con un compost no maduro como aportante de nutrientes y se lo mezclo en diferentes relaciones, siendo las relaciones mayores las que demostraron la eficiencia más alta (1:10)	10 430 ppm	(Ali Koolivand , Naddafi, Nabizadeh, Nasseri, Jafari, Yunesian, & Yaghmaei an, 2013)	

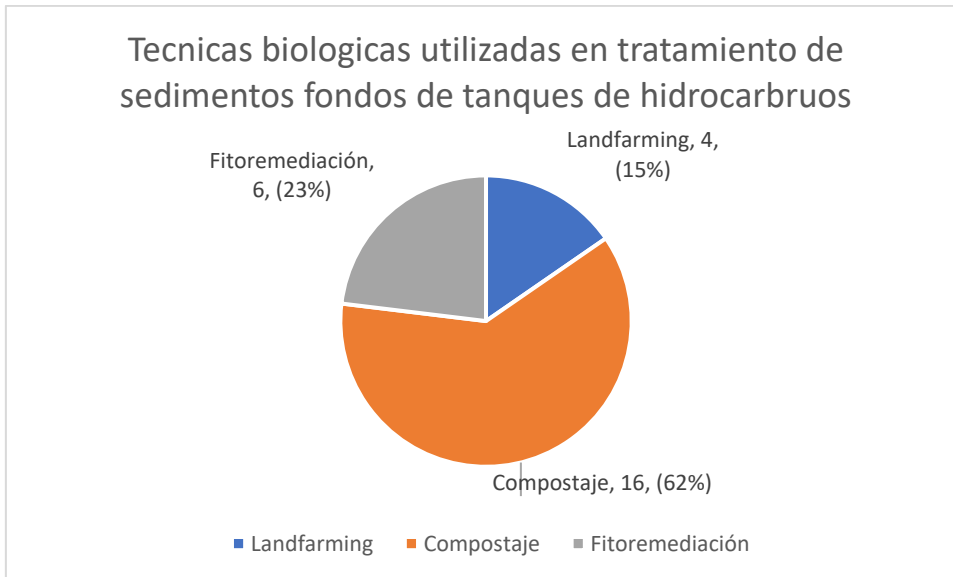
	80.2%	10 seman as	La metodología aplicada en Irán empleo igualmente compost no maduro en diferentes relaciones con los sedimentos pero aplico un post tratamiento una oxidación Femtom, lo que apporto en el porcentaje de degradación	13 037 ppm	(A. Koolivand et al., 2014)
	92%	24 seman as	En esta investigación igualmente se aplicó la metodología de aplicar una mezcla entre los sedimentos con un compost no maduro, pero utilizando como pretratamiento una oxidación Femtom, lo que fue a lo que se atribuyó la eficiencia.	80 000 ppm	(Atagana, 2015)
	71,56 %	70 días	En esta investigación se aplicó igualmente una mezcla con compost, pero con la diferencia que este se encontraba en su etapa madura, estos	104 224 ppm	(Asgari et al., 2017)

			se mezclaron en una relación 1:5 para dar la concentración inicial y se lo colocó en una pila venteadada con humedad entre 45 y 65%.		
90.4%	10 semanas	Este trabajo consistió en mezclar los sedimentos con compost inmaduro en una relación de 1:10, pero previamente aplicando un tratamiento con agua oxigenada H ₂ O ₂ .	61 038 ppm	(Ali Koolivand, Naddafi, Nabizadeh, & Saeedi, 2018)	
84.5%	12 semanas	En esta investigación se realizó una mezcla igualmente con compost no maduro, pero aplicándola en un contenedor aireado, mezclando en una relación de 1:7.	18 817 ppm	(Ali Koolivand et al., 2019)	
56%	14 semanas	En esta metodología se aplicó un contenedor cerrado para el proceso de compostaje, mezclando los sedimentos con	<1000 ppm	(Malakahmad & Jaafar, 2013)	

			residuos de poda y papel, además de con lodos residuales provenientes el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se atribuyo la eficiencia a las mezclas que contaron con mayor porcentaje de lodos residuales.		
--	--	--	---	--	--

Se recopilaron un total de 26 artículos, de los cuales 25 son artículos científicos y una tesis doctoral. Cerca del 15 % de los estudios fueron realizados a escala laboratorio mientras que el restante fue realizado como trabajo de campo.

Esta recopilación de experiencias de técnicas de biorremediación permite identificar diferentes aspectos importantes. Para comenzar se puede mencionar que la técnica que posee una mayor cantidad de artículos científicos y trabajos es el compostaje, equivalente al 62% de todas las experiencias recopiladas, esto se puede observar de manera más clara en la Grafica 5.



Grafica 2 Número de experiencias recopiladas por técnica.

4.2 Comparación general

Landfarming tiene resultados más eficientes en las experiencias que destacaban en temperaturas ambientales más altas, esto resulta ser un factor determinante como nos menciona (Prado et al., 1993) en su estudio, adicionalmente, se destaca que las técnicas que comenzaron con concentraciones iniciales de TPHs más bajas resultaron tener una eficiencia mayor, por lo que es un punto a considerar el hecho de que mediante esta técnica un factor determinante es el acondicionamiento del residuo como se hizo en el estudio de (Shijie Wang et al., 2016).

En cuanto a fitorremediación existe factores a recalcar como lo es que experimentaciones realizadas en mesocosmos tuvieron resultados mayores, esto atribuido a condiciones de laboratorio mejor contraladas que en un trabajo a gran escala, como se identifica en el trabajo de (Nanekar et al., 2015). Otro aspecto para considerar son las bajas eficiencias en general de la técnica, lo que se puede atribuir a las altas concentraciones iniciales de TPHs en las experiencias, por lo que este factor puede ser considerado en futuras aplicaciones, realizando mezclas de los sedimentos con mayor relación con respecto al agente estructurante o técnicas complementarias de tratamiento. Finalmente se puede resaltar el trabajo de fertilizantes presentado por (Muratova

et al., 2010), donde estos facilitaron la remediación, alcanzando una eficiencia comparable con tratamientos a escala laboratorio o en mesocosmos.

En cuanto a la técnica del compostaje, se puede notar que experiencias donde se aplicaron pilas de ventilación forzada o pilas cerradas resultaron tener eficiencias bastante alta como nos demuestra (Ali Koolivand, et al., 2013) en su trabajo. Adicionalmente se puede destacar los excelentes resultados que mostraron las experimentaciones que utilizaron suelo o compost como agentes estructurantes al permitir un mejor acondicionamiento de los sedimentos para su tratamiento, como se mostró en el trabajo de de (Ali Koolivand et al., 2019) (Asgari et al., 2017). Estos factores pueden considerarse dependiendo de la cantidad de sedimentos a tratar, puesto a que en cantidades pequeñas podrían ser tratadas en pilas cerradas con ventilación forzada y si se trata de una cantidad considerable habrá que utilizar un volumen adicional de materiales estructurantes para obtener resultados mejores de remoción de TPHs.

Se puede notar ciertos aspectos acerca del tratamiento de los sedimentos de fondo de tanque de hidrocarburo, como que todas las metodologías priman el uso de un material estructurar y/o fuente de nutrientes para comenzar los procesos de biorremediación, siendo el compostaje donde más se evidencia esta actividad, seguido de la fitorremediación. Esto hace resaltar que en los tratamiento es determinante la utilización de algún material que permita disminuir la concentración de los sedimentos en la medida que facilite el proceso de biorremediación, la justificación a esto es que la mayoría de trabajos donde se utilizaron mezclas con relaciones altas, resultaron tener eficiencias altas en comparación a experiencias donde los sedimentos se mantenían en concentraciones más altas (Ali Koolivand et al., 2018).

Adicionalmente se muestra que no es del todo necesario la implementación de inóculos de microorganismos en la mayoría de las experiencias, lo que puede deberse a que los sedimentos, materiales estructurantes y fuentes de nutrientes ya cuentan con los microorganismos con capacidad de realizar el proceso de biorremediación (Ouyang et al., 2005; X. Wang et al., 2012).

En cuanto a aspectos del lugar de tratamiento, estos resultan ser más importantes en las técnicas de landfarming y fitorremediación, esto relacionado con que estas técnicas se ven más influenciadas por su entorno y condiciones ambientales (Prado et al., 1993), mientras que el compostaje en su dinámica de proceso produce su propia temperatura, por lo que no resulta un aspecto considerable (Antonio & Lorena, 2003). La humedad es un factor determinante en todas las técnicas, ya sea por condiciones ambientales o por intervención de los investigadores (Epstein, 2011).

En relación con los tiempos de tratamiento es posible que estos se hayan manejado por los investigadores por lo que no sean comparables entre ellos, aunque es importante resaltar que existen experiencias con eficiencias bastante altas en tiempos considerablemente cortos. Cabe mencionar que la eficiencia de un tratamiento biológico radica en la medida que se aseguró la temperatura alta durante el proceso (Antonio & Lorena, 2003), por lo que es posible que tratamientos con tiempos más cortos y eficiencias altas se haya asegurado (Saxena, 2015), especialmente en la etapa termófila del compostaje, mientras que en experiencias donde no se mantuvo una correcta temperatura el proceso biológico de remediación se haya realizado de forma más lenta como es evidente en el trabajo de (Muratova et al., 2008).

4.3 Perspectiva Tecnológica

Para realizar un análisis sostenido de las perspectivas de tratamiento de fondos de tanques, es necesario considerar los siguientes aspectos:

- La concentración inicial de TPHs
- La eficiencia promedio en %
- El tiempo de tratamiento

Tabla 2 Tabla de perspectivas tecnológicas

Técnica (# de Casos)	Concentración inicial de TPH en ppm	Eficiencia promedio (%)	Tiempo (días)
Landfarming (4)	162 300- 12 590	72.3	270-1095

Compostaje (3)	>100 000	54.89	56-90
Compostaje (5)	100 000- 50 000	69	32-220
Compostaje (6)	50 000-10 000	81.05	70-370
Compostaje (2)	<10 000	73	98-330
Fitorremediación (6)	66 500- 11500	57	90-1095

La comparación entre los tratamientos de biorremediación de los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos, en base a los artículos recopilados, muestra que el tratamiento que soporta el más alto rango de concentración es landfarming, seguido del compostaje y la fitorremediación finalmente Tabla 2.

En relación con la eficiencia comparada, vemos que el compostaje muestra niveles más altos de eficiencia con valores mayores a 73% en las concentraciones menores a 50 000 ppm de TPHS , seguido de landfarming con valores cercanos al 72,3%, después seguido por las concentraciones entre 100 y 50 mil ppm de TPHs, a continuación la fitorremediación con valores máximos de 57% y para terminar el compostaje de concentraciones mayores a 100 000 ppm con valores cercanos a 55% en promedio.

Los tiempos de tratamiento son menores en los trabajos de compostaje con valores 32-370 días ,en comparación con fitorremediación con 90- 1095 días y landfarming con 270-1095 días (Tabla 3).

En resumen, del análisis efectuado, queda claro que el compostaje es la alternativa de tratamiento más eficiente para el tratamiento biológico de sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos. Con relación al tiempo, también es muy competitivo en comparación con las otras alternativas. Sus indicadores pueden mejorar en virtud de que es una técnica en constante desarrollo y mejora que permite reducir los impactos ambientales de la gestión de una amplia gama de residuos (Sharma et al., 2018).

4.4 Perspectiva Económica

Tabla 3 Precios de tratamientos

Técnica de tratamiento	USD/Tonelada métrica
Incineración	150-2900 USD
Pirolisis	70-460 USD
Vidriado	486-2900 USD
Confinamiento	4500-6700 USD
Encapsulamiento	2900 USD
Landfarming	25- 380 USD
Fitorremediación	20 – 180 USD
Compostaje	30- 250 USD

Como se pudo identificar, los tratamientos de biorremediación son tratamientos altamente efectivos, con altas tasas de degradación de contaminantes hidrocarburiíferos, similares a los tratamientos convencionales como térmicos y de obra civil (Megharaj, Ramakrishnan, Venkateswarlu, Sethunathan & Naidu, 2011).

Considerando los precios unitarios de tratamiento mediante técnicas como landfarming y compostaje, podemos notar que tienen un valor considerablemente menor a técnicas convencionales de alto consumo energético, como incineración, pirolisis, desorción térmica y también en la técnica de confinamiento que requiere grandes inversiones en la construcción obras civiles (Troquet & Troquet, 2002), Fuentes bibliográficas consultadas mencionan que los tratamientos de biorremediación pueden ser entre 80-90% más baratos que métodos convencionales de tratamiento (Megharaj et al., 2011)

Las técnicas de biorremediación presentan ventajas que representan un ahorro económico de importancia, debido a que pueden utilizar residuos provenientes de otras actividades en calidad de fuentes de nutrientes, uso de maquinaria y equipos sencillos. Por otro lado, en trabajos a gran escala, mientras mayor es el volumen para tratar menor es el costo por m³ (Ammann & Koch, 1993). El empleo

de la biorremediación, reduce los gastos de gestión de residuos que repercuten en el crecimiento económico (Marta & Paola, 2010).

Una de las desventajas más evidentes de la biorremediación y por ende del compostaje, es el tiempo necesario para el tratamiento, que suele ser de varios meses e incluso años, en dependencia del tipo y concentración del contaminante (Garzón et al., 2017).

4.5 Comparación con Normativa

Antes de realizar la comparación se eliminaron las experiencias que no reportaban datos iniciales de concentración de TPHs o su concentración inicial ya cumplió con los límites permisibles.

Tabla 4 Cumplimiento de experiencias con Normativa

	Eficiencia	Concentración inicial de TPH	Concentración final de TPH	<4000 uso industrial de suelo	<2500 uso agrícola de suelo	<1000 ecosistema sensible
Landfarming	25.75%	47000	34897.5	no cumple	no cumple	no cumple
	90.04%	12570	1251.972	cumple	cumple	no cumple
	80%	9720	1944	cumple	cumple	no cumple
Fitorremediación	70%	38460	11538	no cumple	no cumple	no cumple
	72.80%	31150	8472.8	no cumple	no cumple	no cumple
	57.38%	27647	11783.1514	no cumple	no cumple	no cumple

	52%	15600	7488	no cumple	no cumple	no cumple
	18%	5000	4100	no cumple	no cumple	no cumple
	70.82%	160000	46688	no cumple	no cumple	no cumple
Compostaje	55%	50000	22500	no cumple	no cumple	no cumple
	60%	93600	37440	no cumple	no cumple	no cumple
	62.10%	118680	44979.72	no cumple	no cumple	no cumple
	80%	13037	2607.4	cumple	no cumple	no cumple
	93%	10000	700	cumple	cumple	cumple
	31%	101400	69966	no cumple	no cumple	no cumple
	49.62%	58300	29371.54	no cumple	no cumple	no cumple
	68.70%	15000	4695	no cumple	no cumple	no cumple
	79.90%	10430	2096.43	cumple	cumple	no cumple
	80.20%	13037	2581.326	cumple	no cumple	no cumple
	92%	80000	6400	no cumple	no cumple	no cumple
	71.56%	104224	29641.305 6	no cumple	no cumple	no cumple
	90.40%	61038	5859.648	no cumple	no cumple	no cumple

	84.50%	18817	2916.635	cumple	no cumple	no cumple
--	--------	-------	----------	--------	-----------	-----------

Según lo observado en la tabla 4, podemos notar que la mayoría de las experiencias no cumplen con la normativa ambiental. Para el parámetro de uso de suelo agrícola las técnicas de landfarming y compostaje destacan teniendo 2 experiencias que cumplen con la normativa. En el caso del parámetro de uso del suelo industrial la técnica de compostaje encabeza los mejores resultados con 5 cumplimientos y landfarming nuevamente con 2. Finalmente con el uso del suelo correspondiente a ecosistemas sensibles únicamente el compostaje cumple con una experiencia. Fitorremediación no registra experiencias que cumplan con ningún parámetro.

Tomando en cuenta lo mostrado anteriormente, se puede atribuir a las altas concentraciones iniciales con las que se trabajó en la mayoría de las experimentaciones, siendo las menores las que resultaron en un cumplimiento de la normativa. Esto nos permite identificar concentraciones iniciales adecuadas para comenzar con este tipo de técnicas de forma que se cumpla con la normativa y fomentar el uso de materiales estructurantes, tamices moleculares o residuos funcionales para mezclar con los sedimentos.

4.6 Perspectiva ambiental

En cuanto a perspectivas ambientales y sociales, se menciona que la biorremediación tiene bastante más aceptación, en comparación con otro tipo de alternativas de tratamiento, debido a que no genera grandes emisiones ni contaminación secundaria, realiza la mineralización completa de los contaminantes y la transformación de los componentes recalcitrantes en compuestos inocuos, que no generan un riesgo para comunidades cercanas a las zonas de tratamiento (Ammann & Koch, 1993).

El principal aspecto para considerar es que la biorremediación es una tecnología ecológicamente amigable, llevando sus procesos de tratamiento a través de la capacidad degradativa propia de organismos vivos, mediante el

acondicionamiento de estos a un entorno propicio donde puedan desarrollar dicha actividad de la mejor manera (Troquet & Troquet, 2002). Las técnicas biológicas emplean operaciones unitarias sencillas, que requieren la aplicación de conocimiento técnico avanzado pero no de tecnologías costosas (Shukla, Singh, & Sharma, 2010), estas técnicas durante años han sido estudiadas y mejoradas para lograr altos niveles de eficiencia en el tratamiento no solo de hidrocarburos, sino también de una amplia gama de residuos (Ammann & Koch, 1993).

Por lo estipulado podemos asegurar, que la implementación de este tipo de tratamientos tiene una influencia positiva sobre el ambiente y sobre la sociedad, ya que permite dar una solución segura, definitiva, innovadora, amigable y económicamente viable, a la gestión integral de diversos residuos contaminantes que se generan en las actividades productivas (Shperber, Shperber, Bokovikova, Marchenko, & Dun, 2017).

5 Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Durante la redacción de este trabajo se logró recopilar bastante información respecto a biorremediación, haciendo un énfasis especial en los sedimentos de fondos de tanque de hidrocarburos, obteniendo cerca de 26 artículos científicos que hacen referencia a técnicas de técnicas biológicas aplicadas a este tipo de residuo hidrocarburiíferos en específico, siendo 16 artículos acerca del compostaje como técnica central de esta trabajo de fin de carrera.

Esta recopilación puede ser útil en futuras investigaciones ya que permitirá a investigadores, docentes o estudiantes, obtener datos de forma más rápida cuando se haga un trabajo acerca de estas técnicas de biorremediación y los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos. Cabe recalcar que a lo largo de la investigación no se identificaron artículos científicos ni trabajos que hayan tratado este tipo de residuos a nivel nacional, destacando una falta de investigación de temas relacionados a la biorremediación en el Ecuador.

Adicionalmente se logró determinar el potencial de la técnica del compostaje para tratar estos sedimentos, en comparación con otras técnicas como landfarming y fitorremediación, siendo la más eficiente de todos los tratamientos cuando se trabaja al residuo en concentraciones entre 10 a 50 mil ppm de TPHS. Además de trabajar con los tiempos más cortos en todas sus concentraciones, lo que lo destaca dentro las técnicas biológicas.

Cabe mencionar que en cuanto a aspectos económicos de esta técnica es donde destacó frente a técnicas tradicionales de tratamiento como técnicas energéticas como incineración y pirolisis o técnicas de obra civil como confinamiento en celdas, donde destaco junto al resto de técnicas de biorremediación con uno de los precios de tratamiento más bajos.

En aspectos ambientales también resulto ser una alternativa bastante eficiente puesto a que su potencial degradativo junto con su aceptación como una tecnología la posiciona como una de las técnicas más adecuadas para su implementación en el Ecuador, esto debido a que el país necesita de técnicas eficientes y baratas, que adicionalmente cumplan un papel amigable con el medio ambiente y den resultados positivos en poco tiempo, además de factores ambientales como temperatura, humedad y disponibilidad de materiales para su implementación, los cuales el país posee.

Finalmente para concluir se puede mencionar que se logró evaluar la eficiencia del compostaje, donde se demostró que cumple con las condiciones adecuadas para ser una técnica para la biorremediación de los sedimentos de fondos de tanques de hidrocarburos, esto se puede ratificar con el hecho de que a nivel internacional se encuentran más estudios e investigaciones aplicando esta técnica que cualquier otra técnica de tratamiento de este residuos hidrocarburíferos.

5.2 Recomendaciones

Como recomendaciones tras realizar este trabajo, pongo en conocimiento que existe más información respecto a los sedimentos de fondos de tanques usando

el termino en ingles de “sludge” que usando el término “sediments”, por lo que se recomienda utilizar este término en la investigación bibliográfica.

Adicionalmente se recomendaría hacer más énfasis en futuras investigaciones acerca de este residuo y posibles usos alternos para los sedimentos, es decir, darles un uso en algún tipo de proceso productivo, aprovechando sus condiciones y características.

Finalmente se proponer un diseño de tratamiento para los sedimentos de fondos de tanques. El factor principal consiste en la implementación de un material que funcione como agente estructurante, para lo que se puede recomendar en base a estudios previos una mezcla con suelo, residuos vegetales o compost no maduro y con estiércol de animal, al final de este proceso se debe obtener una mezcla de 1:10 entre los sedimentos y los agentes estructurantes, lo que probablemente ubicara la concentraciones de TPHs entre 30 000 a 10 000 ppm, adicionalmente estos deberán cumplir la relación C:N:P:K de 100:3:1.1. Posteriormente se debe mezclar con un tamices molecular, se recomienda que este sea zeolita y se agregue a la mezcla en una cantidad de entre 1000 a 400 gramos por m³ de mezcla. Posteriormente se debe elaborar las pilas con dimensiones y mantener los parámetros en cantidades cercanas a las mencionadas en la bases teóricas. Una vez realizado esto se deberá realizar el volteo de la pila al menos una vez a la semana y mantener la humedad en un rango adecuado. Se estima que él se podrá obtener resultados aceptables a partir del tercer mes en adelante mientras se haya mantenido una buena temperatura durante el proceso.

6 Referencias

- Adams, G. O., Fufeyin, P. T., Okoro, S. E., & Ehinomen, I. (2015). Bioremediation, Biostimulation and Bioaugmentation: A Review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 3(1), 28–39. <https://doi.org/10.12691/ijebb-3-1-5>
- Agwaramgbo, L., Magee, N., Nunez, S., & Mitt, K. (2013). Biosorption and Chemical Precipitation of Lead Using Biomaterials, Molecular Sieves, and

- Chlorides, Carbonates, and Sulfates of Na & Ca. *Journal of Environmental Protection*, 04(11), 1251–1257. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.411145>
- Aimin Li, S. C. (2015). High Quality Oil Recovery from Oil Sludge Employing a Pyrolysis Process with Oil Sludge Ash Catalyst. *International Journal of Waste Resources*, 05(02). <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000176>
- Alejandra Trujillo Toro, M., & Fernando Ramírez Quirama, J. (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. (Spanish). *Bioremediation in Soil Contaminated with Hydrocarbons in Colombia. (English)*, 5(Ercoli 2000), 63–67.
- Alfaro, S. (2007). *Desarrollo de Materiales Porosos para Adsorción y Separación de Gases*. 1–15.
- Allen, E., & Smith, G. (1979). *METHOD FOR THE CONTAINMENT OF OIL AND OIL SLUDGES*. (19).
- Alvarez, P. J. J., & Illman, W. A. (2005). Bioremediation and Natural Attenuation. In *Bioremediation and Natural Attenuation*. <https://doi.org/10.1002/047173862x>
- Ammann, P. R., & Koch, G. S. (1993). Technical and economic analyses in the development of bioremediation processes. *Remediation Journal*, 4(1), 115–128. <https://doi.org/10.1002/rem.3440040108>
- Andalucía Luz. (2000). 3. Sistemas Y Técnicas Para El Compostaje. *Junta de Andalucía*, 1, 7. Retrieved from [http://digital.csic.es/bitstream/10261/16792/1/2000 Compost CIEMAT.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/16792/1/2000%20Compost%20CIEMAT.pdf)
- Antonio, J., & Lorena, T. (2003). El composteo: una alternativa tecnológica para la biorremediación de suelos en México. *Transactions, Institution of Mining & Metallurgy, Section B*, (Special Issue), 44–46.
- Anza Cruz, H. G., Orantes Calleja, P. D., González Herrera, R., Ruiz Marín, A., Espinoza Medinilla, E., Martínez Salinas, R. I., ... Vera Toledo, P. (2016). Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados

mediante sistema de biopilas. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, 5(12), 49–77. <https://doi.org/10.31644/imasd.12.2016.a04>

Asgari, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A. H., Nasser, S., Dehghani, M. H., Nazmara, S., & Yaghmaeian, K. (2017). Biodegradation of total petroleum hydrocarbons from acidic sludge produced by re-refinery industries of waste oil using in-vessel composting. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s40201-017-0267-1>

Atagana, H. I. (2015). Biological Degradation of Crude Oil Refinery Sludge with Commercial Surfactant and Sewage Sludge by Co-Composting. *Soil and Sediment Contamination*, 24(5), 494–513. <https://doi.org/10.1080/15320383.2015.985375>

Billings, I. R. (1997). *MICRO ENCAPSULATION OF HYDROCARBONS AND CHEMICALS*. (19).

Bojes, H. K., & Pope, P. G. (2007). Characterization of EPA's 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tank bottom solids and associated contaminated soils at oil exploration and production sites in Texas. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 47(3), 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.11.007>

Burlakovs, J., Klavins, M., & Karklina, A. (2013). Remediation of Soil Contamination with Heavy Metals by Using Zeolite and Humic Acid Additives. *Latvian Journal of Chemistry*, 51(4), 336–341. <https://doi.org/10.2478/v10161-012-0019-6>

Cerqueira, V. S., Hollenbach, E. B., Maboni, F., Vainstein, M. H., Camargo, F. A. O., Peralba, M. do C. R., & Bento, F. M. (2011). Biodegradation potential of oily sludge by pure and mixed bacterial cultures. *Bioresource Technology*, 102(23), 11003–11010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.074>

Chang, C. Y., Shie, J. L., Lin, J. P., Wu, C. H., Lee, D. J., & Chang, C. F. (2000). Major Products Obtained from the Pyrolysis of Oil Sludge. *Energy and Fuels*, 14(6), 1176–1183. <https://doi.org/10.1021/ef0000532>

- Chukhareva, N., Korotchenko, T., & Yurkin, A. (2015). Design of automated oil sludge treatment unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 27(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012060>
- Cochran, B. J., & Carney, W. A. (1996). *Basic Principles of Composting*.
- Correa. (2018). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE AGENTES BIOCIDAS EN LA ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE DIÉSEL*. (4). <https://doi.org/10.1590/s1809-98232013000400007>
- Cullinane, J., Jones, L., & Malone, P. (1986). *Handbook for stabilization/solidification of hazardous waste*.
- De-Qing, S., Jian, Z., Zhao-Long, G., Jian, D., Tian-Li, W., Murygina, V., & Kalyuzhnyi, S. (2007). Bioremediation of oil sludge in Shengli oilfield. *Water, Air, and Soil Pollution*, 185(1–4), 177–184. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9440-y>
- Docampo, R. (2013). Compostaje y Compost. *Inia*, 63–67. Retrieved from <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1839/1/128221231213112259.pdf>
- Echeverría, V., Monsalve, G., & Vidales, H. (2002). Continuous treatment of oily sludge at colombian refineries. *CT and F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(3), 61–70.
- Eisler, R. (1987). Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Hazards To Fish, Wildlife, and Invertebrates: a Synoptic Review. *Biological Report*, 85(11), 1–11.
- El Mahdi, A. M., Aziz, H. A., & Eqab, E. S. (2017). Review on innovative techniques in oil sludge bioremediation. *AIP Conference Proceedings*, 1892(October). <https://doi.org/10.1063/1.5005706>
- Epstein, E. (2011). Industrial composting: Environmental engineering and facilities management. In *Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management*.

- Fieser, L., & Fieser, M. (1967). *Reagents for Organic Synthesis*.
- Fingas, M. (2015). *Manual de derrames ciencia y tecnología* (Vol. 3).
- Fitri, I., Ni'Matuzahroh, & Surtiningsih, T. (2017). Bioremediation of oil sludge using a type of nitrogen source and the consortium of bacteria with composting method. *AIP Conference Proceedings*, 1854. <https://doi.org/10.1063/1.4985402>
- Fountoulakis, M. S., Terzakis, S., Georgaki, E., Drakopoulou, S., Sabathianakis, I., Kouzoulakis, M., & Manios, T. (2009). Oil refinery sludge and green waste simulated windrow composting. *Biodegradation*, 20(2), 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10532-008-9211-5>
- Garcia-Rivero, M., & Peralta-Perez, M. R. (2008). Cometabolismo en la biodegradacion de hidrocarburos. *Revista Mexicana de Ingeniera Qumica*, 7(1), 1–12.
- García, M. G., Carmen, I., & López, L. (2012). Biodegradación de un crudo mediano en suelos de diferente textura con y sin agente estructurante. *Bioagro*, 24(2), 93–102.
- Garzón, J. M., Rodríguez Miranda, J. P., & Hernández Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>
- Gaur, A. C., Sadasivam, K. V., Mathur, R. S., & Magu, S. P. (1982). Rôle of mesophilic fungi in composting. *Agricultural Wastes*, 4(6), 453–460. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(82\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0141-4607(82)90040-3)
- Genouw, G., de Naeyer, F., van Meenen, P., van de Werf, H., de Nijs, W., & Verstraete, W. (1994). Degradation of oil sludge by landfarming - a case-study at the Ghent harbour. *Biodegradation*, 5(1), 37–46. <https://doi.org/10.1007/BF00695212>
- Gentry, T. J., Rensing, C., & Pepper, I. L. (2004). New approaches for bioaugmentation as a remediation technology. *Critical Reviews in*

Environmental Science and Technology, 34(5), 447–494.
<https://doi.org/10.1080/10643380490452362>

Gómez, R. B. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos...*

González, C. J. B. (2013). *Determinación del comportamiento de los componentes contaminantes en el sistema de alimentación Diesel Determination of the behavior of the polluting components in the system of Diesel feeding*. 22(4), 65–68.

González Rojas, E. H. (2011). Concepto y estrategias de biorremediación. *Inge@uan*, 1(1), 20–29.

Gualoto, M. (2008). *Tratamiento de residuos industriales hidrocarbúricos mediante landfarming en plataforma. Weatherford Ecuador*.

Hadibarata, T., & Kristanti, R. A. (2012). Fate and cometabolic degradation of benzo[a]pyrene by white-rot fungus *Armillaria* sp. F022. *Bioresource Technology*, 107, 314–318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.046>

Hamoda, M. F., Hamam, S. E. M., & Shaban, H. I. (1989). Volatilization of crude oil from saline water. *Oil and Chemical Pollution*, 5(5), 321–331. [https://doi.org/10.1016/S0269-8579\(89\)80023-1](https://doi.org/10.1016/S0269-8579(89)80023-1)

Hills, E. B. & C. (2015). *Stabilization and Solidification of Contaminated Soil and Waste : A Manual of Practice Edward Bates and Colin Hills*.

Hoitink, H. A. J. (1998). The Science of Composting. *Journal of Environmental Quality*, 27(1), 246–246. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700010039x>

Hu, G., Li, J., & Zeng, G. (2013). Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 470–490. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.069>

Islam, B. (2015). Petroleum sludge, its treatment and disposal: A review. *International Journal of Chemical Sciences*, 13(4), 1584–1602.

Junta de Andalucía. (2013). *Equipos Y Maquinaria Para El Compostaje De*

- Alpeorujos*. 86. Retrieved from http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/equipos_y_maquinaria.pdf
- Karge, H. G., & Geidel, E. (2004). Spectroscopic Investigations of Zeolite Properties. *Springer*, 4, 1–540. <https://doi.org/10.1007/b94235>
- Klamer, M., & Bååth, E. (1998). Microbial community dynamics during composting of straw material studied using phospholipid fatty acid analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, 27(1), 9–20. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(98\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(98)00051-8)
- Koolivand, A., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Jafari, A. J., Nasser, S., Yunesian, M., ... Alimohammadi, M. (2014). Application of hydrogen peroxide and Fenton as pre- and post-treatment steps for composting of bottom sludge from crude oil storage tanks. *Petroleum Science and Technology*, 32(13), 1562–1568. <https://doi.org/10.1080/10916466.2012.697961>
- Koolivand, Ali, Abtahi, H., Godini, K., Saeedi, R., Rajaei, M. S., Parhamfar, M., & seifi, H. (2019). Biodegradation of oil tank bottom sludge using a new two-phase composting process: kinetics and effect of different bulking agents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(6), 1280–1290. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00881-x>
- Koolivand, Ali, Naddafi, K., Nabizadeh, R., Nasser, S., Jafari, A. J., Yunesian, M., ... Nazmara, S. (2013). Biodegradation of petroleum hydrocarbons of bottom sludge from crude oil storage tanks by in-vessel composting. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 95(1), 37–41. <https://doi.org/10.1080/02772248.2012.753073>
- Koolivand, Ali, Naddafi, K., Nabizadeh, R., Nasser, S., Jafari, A. J., Yunesian, M., & Yaghmaeian, K. (2013). Degradation of petroleum hydrocarbons from bottom sludge of crude oil storage tanks using in-vessel composting followed by oxidation with hydrogen peroxide and Fenton. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15(3), 321–327. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0121-1>
- Koolivand, Ali, Naddafi, K., Nabizadeh, R., & Saeedi, R. (2018). Optimization of

- combined in-vessel composting process and chemical oxidation for remediation of bottom sludge of crude oil storage tanks. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 39(20), 2597–2603. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1362037>
- Kriipsalu, M., & Nammari, D. (2010). Monitoring of biopile composting of oily sludge. *Waste Management and Research*, 28(5), 395–403. <https://doi.org/10.1177/0734242X09337749>
- Liu, T., Zhang, Z., Dong, W., Wu, X., & Wang, H. (2017). Bioremediation of PAHs contaminated river sediment by an integrated approach with sequential injection of co-substrate and electron acceptor: Lab-scale study. *Environmental Pollution*, 230, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.063>
- Lladó Fernández, S. (2012). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos pesados y caracterización de comunidades microbianas implicadas. *Facultad De Biología*.
- Llano Zapata, J. E. (2016). Tomo I. *Memorias Histórico, Físicas, Crítico, Apologéticas de La América Meridional*, 143–411. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.4989>
- López, F. A. (2002). *Cerámica y Vidrio Solidificación / Estabilización de residuos orgánicos mediante granulación con sepiolita*. 305(8), 305–309.
- Mahar, H., Training, T., Jatoi, A. S., Karachi, T., Akhtar, K. S., & Training, T. (2016). Characterization of the Sludge Deposits in Crude Oil Storage Tanks. *Journal of Faculty of Engineering & Technology*, 23(1), 57-64–64.
- Malakahmad, A., & Jaafar, N. (2013). Oil sludge contaminated soil bioremediation via composting using refinery treatment plant sludge and different bulking agents. *BEIAC 2013 - 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium*, 832–835. <https://doi.org/10.1109/BEIAC.2013.6560252>
- Malwana, C., Weerasinghe, T. K., & Pilapitiya, S. (2013). Determination of

- Optimal Pile Dimensions during Thermophilic Windrow Composting of Municipal Solid Waste (Msw) in Sri Lanka. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, (February 2019), 552–556. <https://doi.org/10.7763/ijbbb.2013.v3.274>
- Marin, J. A., Hernandez, T., & Garcia, C. (2005). Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity. *Environmental Research*, 98(2), 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.06.005>
- Marín, J. A., Moreno, J. L., Hernández, T., & García, C. (2006). Bioremediation by composting of heavy oil refinery sludge in semiarid conditions. *Biodegradation*, 17(3), 251–261. <https://doi.org/10.1007/s10532-005-5020-2>
- Marta, M., & Paola, D. (2010). *Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación*. 1–33.
- Martinez, D., Ferrera-Cerrato, R., & Ortega, H. (2016). Composting in Bio-Piles for the Clean-Up of Soils. *Agroproductividad*, 9(8), 45–51.
- Martinez, V., & Lopez, F. (2001). *Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso*.
- Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., & Naidu, R. (2011). Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective. *Environment International*, 37(8), 1362–1375. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.003>
- Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2011). El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. *Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad Del Suelo*, 2(38270), 174–183.
- México. Secretaría de Desarrollo Social. (2001). Manual técnico administrativo para el servicio de limpia municipal. *Sedesol, cap 6*, 113. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap6.pdf>
- Miller, J. G., Michael, E., Wax, J., F., R. W., Aller, L. B., Durham, D. R., & Frederick, A. B. (1996). *PROCESS UPSET-RESISTANT INORGANIC*

SUPPORTS FOR BIOREMEDIATION. (19).

- Milne, B. J., Baheri, H. R., & Hill, G. A. (1998). Composting of a heavy oil refinery sludge. *Environmental Progress*, 17(1), 24–27. <https://doi.org/10.1002/ep.670170115>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, & Amigos de la tierra. (2010). Manual de Compostaje. *Amigos de La Tierra*, 21. Retrieved from http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/manual_de_compostaje_2011_paginas_1-24_tcm7-181450.pdf%0Apapers3://publication/uuid/B3A2C71D-750D-488A-952C-C3C22FBB9173
- Moslemy, P., Guiot, S. R., & Neufeld, R. J. (2002). Production of size-controlled gellan gum microbeads encapsulating gasoline-degrading bacteria. *Enzyme and Microbial Technology*, 30(1), 10–18. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(01\)00440-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(01)00440-9)
- Muratova, A. Y., Bondarenkova, A. D., Panchenko, L. V., & Turkovskaya, O. V. (2010). Use of integrated phytoremediation for cleaning-up of oil-sludge-contaminated soil. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 46(8), 789–794. <https://doi.org/10.1134/S0003683810080090>
- Muratova, A. Y., Dmitrieva, T. V., Panchenko, L. V., & Turkovskaya, O. V. (2008). Phytoremediation of oil-sludge-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 10(6), 486–502. <https://doi.org/10.1080/15226510802114920>
- Nanekar, S., Dhote, M., Kashyap, S., Singh, S. K., & Juwarkar, A. A. (2015). Microbe assisted phytoremediation of oil sludge and role of amendments: a mesocosm study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(1), 193–202. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0400-3>
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2014). *Principios de bioquímica Índice general*. 6th, 1192.
- Newman, A. (2006). *POLLUTANT CONTAINMENT SYSTEM*. 2(12).

- Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 89, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.057>
- Noïk, C., Malot, H., Dalmazzone, C., & Mouret, A. (2004). Encapsulation of crude oil emulsions. *Oil and Gas Science and Technology*, 59(5), 535–546. <https://doi.org/10.2516/ogst:2004038>
- Olguín, E. J., Hernández, M. E., & Sánchez-Galván, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 23(3), 139–154.
- Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 100526. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100526>
- Ouyang, W., Liu, H., Murygina, V., Yu, Y., Xiu, Z., & Kalyuzhnyi, S. (2005). Comparison of bio-augmentation and composting for remediation of oily sludge: A field-scale study in China. *Process Biochemistry*, 40(12), 3763–3768. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.06.004>
- Panchenko, L., Muratova, A., & Turkovskaya, O. (2017). Comparison of the phytoremediation potentials of *Medicago falcata* L. And *Medicago sativa* L. in aged oil-sludge-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 3117–3130. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8025-y>
- Pedley, J. F., Hiley, R. W., & Hancock, R. A. (1987). Storage stability of petroleum-derived diesel fuel. 1. Analysis of sediment produced during the ambient storage of diesel fuel. *Fuel*, 66(12), 1646–1651. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90356-5](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90356-5)
- Pedley, J. F., Hiley, R. W., & Hancock, R. A. (1988). Storage stability of petroleum-derived diesel fuel. 3. Identification of compounds involved in sediment formation. *Fuel*, 67(8), 1124–1130. <https://doi.org/10.1016/0016->

2361(88)90381-X

- Pedro Bueno, M. D., & Cabrera, F. (2008). Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje. *Advanced Materials*, 29(10). <https://doi.org/10.1002/adma.201604105>
- Piazzese, D., Corsino, S. F., Torregrossa, M., Bongiorno, D., Indelicato, S., & Viviani, G. (2018). Effect of a co-substrate supply in a MBR treating shipboard slop: Analysis of hydrocarbon removal, biomass activity and membrane fouling tendency. *Biochemical Engineering Journal*, 140, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.10.003>
- Prado, M., Correa, M., Rodriguez, J., & Carneiro, M. (1993). *Oil sludge landfarming biodegradation, experiment conducted at a tropical site in eastern Venezuela*.
- Prieto, G. (2015). Control De Calidad Del Proceso De Compostaje En Incauca Sa. *Researchgate.Net*, (October). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4329.0324>
- Ramirez, D., & Dussan, J. (2014). Landfarmed oil sludge as a carbon source for *Canavalia ensiformis* during phytoremediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(5), 1197–1206. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0575-2>
- RAOHE 1215. (1998). *Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas 1215*. (2982), 83. Retrieved from www.lexis.com.ec%0Afaolex.fao.org/docs/texts/ecu79497.doc
- Raut, M. P., Prince William, S. P. M., Bhattacharyya, J. K., Chakrabarti, T., & Devotta, S. (2008). Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste - A compost maturity analysis perspective. *Bioresource Technology*, 99(14), 6512–6519. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.030>
- Rebollido, R., Martínez, J., Aguilera, Y., Melchor, K., Koerner, I., & Stegmann, R. (2008). Microbial populations during composting process of organic fraction

- of municipal solid waste. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6(3), 59–65. https://doi.org/10.15666/aeer/0603_061067
- Recer, G. M., Browne, M. L., Horn, E. G., Hill, K. M., & Boehler, W. F. (2001). Ambient air levels of *Aspergillus fumigatus* and thermophilic actinomycetes in a residential neighborhood near a yard-waste composting facility. *Aerobiologia*, 17(2), 99–108. <https://doi.org/10.1023/A:1010816114787>
- Rodríguez, D. T. (2003). *El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos*.
- Roman, P., Martinez, M., & Pantoja, A. (2015). *Farmer's compost handbook Experience in Latin America*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3388e.pdf>
- Rossiana, N., Joko, K., & Yayat, D. (2018). Utilization of *Talaromyces* sp., *Cladosporium* sp. and *Albizia* (*Paraserianthes falcataria* L. Nielsen) Mycorrhizae on the Phytoremediation of Oil Sludge: Changes of Lead, Nickel, Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) Co. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 09(01), 1–5. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000354>
- Salazar, J. (2018). ALTERNATIVAS DE ENCAPSULAMIENTO PARA LODOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS, GENERADOS EN LAVADORAS Y LUBRICADORAS DE LA CIUDAD DE LATACUNGA. In *Universidad Técnica De Cotopaxi Facultad* (Vol. 1). Retrieved from <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4501/1/PI-000727.pdf>
- Sarika Saxena, V. P. (2015). Treatment of Oil Sludge Contamination by Composting. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 06(03). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000284>
- Shahsavari, E., Adetutu, E. M., & Ball, A. S. (2016). Bioremediation of Sludge Obtained from Oil/Biofuel Storage Tanks. *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols - Springer Protocols Handbooks*, (June 2015), 249–268. <https://doi.org/10.1007/8623>

- Sharma, J. K., Gautam, R. K., Nanekar, S. V., Weber, R., Singh, B. K., Singh, S. K., & Juwarkar, A. A. (2018). Advances and perspective in bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(17), 16355–16375. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8995-4>
- Shi, J. X. (2013). The applications of Zeolite in sustainable binders for soil stabilization. *Applied Mechanics and Materials*, 256–259(PART 1), 112–115. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.112>
- Shperber, E. R., Shperber, D. R., Bokovikova, T. N., Marchenko, L. A., & Dun, I. R. (2017). Technology and Economics of Recycling Oil-Tank Sediments. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(3–4), 203–207. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0322-x>
- Shukla, K. P., Singh, N. K., & Sharma, S. (2010). Bioremediation: Developments, current practices and perspectives. *Genetic Engineering and Biotechnology Journal*, 2010, 1–20.
- Silva, M. L. B. da, & Alvarez, P. J. J. (2010). Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, (November). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77587-4>
- Speight, J. G., & Arjoon, K. K. (2012). *Bioremediation of Petroleum and Petroleum Products*. New Jersey: Wiley.
- Suganya, K., Sivapragasam, C., Sharma, N. K., & Vanitha, S. (2019). Current Trends on Oil Sludge Characterization, Toxicity and Treatment Systems. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(4S2), 13–17. <https://doi.org/10.35940/ijrte.d1004.1284s219>
- Sundberg, C., Smårs, S., & Jönsson, H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology*, 95(2), 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.016>
- Svet, V. D., & Tsysar', S. A. (2018). Acoustic Profiling of Bottom Sediments in

- Large Oil Storage Tanks. *Acoustical Physics*, 64(1), 115–121. <https://doi.org/10.1134/S1063771018010177>
- Szostak, R. (1989). *Molecular Sieves Principles of Synthesis and Identification*.
- Tiquia, S. M., Wan, H. C., & Tam, N. F. Y. (2002). Microbial population dynamics and enzyme activities during composting. *Compost Science and Utilization*, 10(2), 150–161. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702075>
- Troquet, J., & Troquet, M. (2002). Economic aspects of polluted soil bioremediation. *Brownfield Sites: Assessment, Rehabilitation and Development*, 267–276.
- Ubani, O. (2012). *Compost bioremediation of oil sludge by using different manures under laboratory conditions*. (June). Retrieved from <http://uir.unisa.ac.za/handle/10500/6594>
- Ubani, O., Atagana, I. H., & Thantsha, S. M. (2013). Biological degradation of oil sludge: A review of the current state of development. *African Journal of Biotechnology*, 12(47), 6544–6567. <https://doi.org/10.5897/ajb11.1139>
- Umaña, J. C. (2002). *Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón*. 252.
- Vallejo, V., Salgado, L., Roldan, F., Sc, M., & Profesor Asistente, P. D. (2005). Bioestimulation process during the biodegradation of TPH in oil contaminated soil. *Rev. Colomb. Biotechnol*, VII(Diciembre), 67–78. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/776/77670209.pdf>
- Vdovenko, S., Boichenko, S., & Kochubei, V. (2015). Composition and properties of petroleum sludge produced at the refineries. *Chemistry and Chemical Technology*, 9(2), 257–260. <https://doi.org/10.23939/chcht09.02.257>
- Velásquez Arias, J. A. (2018). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151–167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>

- Vidonish, J. E., Zygourakis, K., Masiello, C. A., Sabadell, G., & Alvarez, P. J. J. (2016). Thermal Treatment of Hydrocarbon-Impacted Soils: A Review of Technology Innovation for Sustainable Remediation. *Engineering*, 2(4), 426–437. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.005>
- Villar, I., Alves, D., Garrido, J., & Mato, S. (2016). Evolution of microbial dynamics during the maturation phase of the composting of different types of waste. *Waste Management*, 54, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.011>
- Walspurger, S., & Sommer, J. (2010). Reactions in Zeolites. *Molecular Encapsulation: Organic Reactions in Constrained Systems*, 117–143. <https://doi.org/10.1002/9780470664872.ch5>
- Wang, H., Zhao, Y., Wei, Y., Zhao, Y., Lu, Q., Liu, L., ... Wei, Z. (2018). Biostimulation of nutrient additions on indigenous microbial community at the stage of nitrogen limitations during composting. *Waste Management*, 74, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.004>
- Wang, Shanshan, Huang, L., Gan, L., Quan, X., Li, N., Chen, G., ... Yang, F. (2012). Combined effects of enrichment procedure and non-fermentable or fermentable co-substrate on performance and bacterial community for pentachlorophenol degradation in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 120, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.022>
- Wang, Shijie, Wang, X., Zhang, C., Li, F., & Guo, G. (2016). Bioremediation of oil sludge contaminated soil by landfarming with added cotton stalks. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 106, 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.10.014>
- Wang, X., Wang, Q., Wang, S., Li, F., & Guo, G. (2012). Effect of biostimulation on community level physiological profiles of microorganisms in field-scale biopiles composed of aged oil sludge. *Bioresource Technology*, 111, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.158>
- Zawierucha, I., & Grzegorz, M. (2014). Bioaugmentation for In Situ Soil Remediation: How to Ensure the Success of Such a Process

Bioaugmentation for In Situ Soil Remediation : How to Ensure the Success of Such a Process. In *Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol, Soil Biology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7>

Zhang, Z., & Lo, I. M. C. (2015). Biostimulation of petroleum-hydrocarbon-contaminated marine sediment with co-substrate: involved metabolic process and microbial community. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(13), 5683–5696. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6420-9>

