

Artículo de Revisión

Tratamientos biológicos y físicos en la recuperación de suelos contaminados por petróleo crudo

BIOLOGICAL AND PHYSICAL TREATMENTS IN THE RECOVERY OF SOILS CONTAMINATED BY CRUDE OIL

JHOSELIN TARAZONA-OCAMPO§*, ANGGY SOTO-DELGADO§,
RICARDO ARIAS-SALCEDO§

Recibido: 20 octubre de 2020 / Aceptado: 05 noviembre de 2020

§Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad Peruana Unión (Sede Tarapoto), Tarapoto, Perú

Resumen

Las tecnologías para la recuperación de suelos contaminados con petróleo crudo pueden clasificarse como físicos, químicos y biológicos, y se diferencian por su capacidad de remoción; el presente estudio se realizó con el objetivo de identificar el mejor tratamiento para recuperar suelos degradados por emisiones con petróleo crudo, para ello se seleccionó diez tratamientos en los cuales fueron seleccionados de acuerdo al análisis de la metadata conformada por la revisión de los indicadores de las variables, obteniendo cuatro tratamientos: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados, evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp. y *Pseudomonas* sp. para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo y el tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural. También se realizó el análisis comparativo entre los tratamientos para ser calificados por sus cualidades de impacto ambiental y riesgo en función del insumo utilizado. El mejor tratamiento fue el de colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados.

Palabras clave: Eficiencia, petróleo crudo, recuperación, suelos contaminados, tratamientos.

Abstract

Technologies for the recovery of soils contaminated with crude oil can be classified as physical, chemical and biological, and are differentiated by their removal capacity; The present study was carried out with the objective of identifying the best treatment to recover soils degraded by emissions with crude oil, for this ten treatments were selected in which they were selected according to the analysis of the goal formed by the review of the indicators of the variables, obtaining four treatments: Bacterial colonies present in the manure of white hens of the leghorn strain responsible for the biodegradation of oil in contaminated soils, evaluation of the efficacy of *Trichoderma* sp and *Pseudomonas* sp for bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons, hydroalcoholic extract of Orange peels (*Citrus sinensis*) as biostimulator in oil-contaminated savanna soil and ex situ treatment of hydrocarbon-contaminated soil through the natural volatilization method. A comparative analysis was also carried out between the treatments to be qualified for their environmental impact and risk qualities depending on the input used. The best treatment was that of bacterial colonies present in the manure of white hens of the leghorn strain responsible for the biodegradation of oil in contaminated soils.

Keywords: Efficiency, crude oil, recovery, contaminated soils, treatments.

*Correspondencia de autor: E-mail: jhoselintarazona@upeu.edu.pe

INTRODUCCIÓN

El petróleo aún es la principal materia prima para la generación de energía en el mundo, la desigualdad en la localización geográfica de grandes reservas de petróleo en el planeta y la magnitud de las inversiones que se requieren para producirlo. En los últimos años la extracción de este recurso está considerado como un problema ambiental (Paneque *et al.*, 2016; Friends of the Earth Europe [FoEE], 2016). Por otro lado, los macroprocesos de la industria petrolera también representan un gran problema porque sus residuos son expulsados al medio ambiente mayormente sin ningún tratamiento (Ávila, 2016).

Según Grados y Pacheco (2016), el Perú cuenta con diversos yacimientos de petróleo, destacando la zona noroccidental, el zócalo continental y la selva peruana (norte). Esta última zona es la más importante porque de ella se extrae el mayor volumen total en el país. El traslado del hidrocarburo de la selva a la costa se realiza por el oleoducto norperuano y se encuentra a cargo de la empresa Petroperú. La gestión del traslado del oleoducto se ha visto cuestionada por los diversos derrames de petróleo que han afectado al ambiente, sobre todo a los ríos, provocando pérdidas irremediables de fauna y flora.

En el año 2016 se produjeron derrames, alcanzando hasta trece fugas de petróleo, se vertió en promedio 6.000 barriles con petróleo en las localidades de Loreto y Amazonas (Comercio, 2016). En el 2017 OEFA afirmó que se produjo el derrame de 3 500 galones de petróleo, producto del despiste de una cisterna en el kilómetro 44 de la carretera Yurimaguas (Tarapoto), afectó a la fauna (aves y peces) de la quebrada Sabaloyacu y del río Caynarachi (Servicios en Comunicación Interactual [SERVINDI], 2017).

Es necesario tomar en cuenta que la mayoría de los pobladores de la zona afectada carecen de los servicios básicos y no cuentan con agua potable, por lo que hacen uso de las aguas de los ríos aledaños para su consumo, así como de los peces que habitan en ellos. Por lo que al ser contaminados con petróleo derramado impacta directamente en la vida de los pobladores, limitando el consumo de agua y de alimentos, ya que el crudo derramado afecta los suelos, sus cosechas y especies comestibles y nativas alrededor de la zona de impacto (Mujica *et al.*, 2019).

Las tecnologías para la recuperación de suelos contaminados con petróleo crudo pueden clasificarse de diferentes maneras, como físicos, químicos y biológicos los cuales se diferencian por la capacidad de remoción; el presente estudio tuvo el objetivo de identificar el mejor tratamiento para recuperar suelos degradados por emisiones con petróleo crudo.

MATERIALES Y MÉTODOS

DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Flores y Mendoza (2017) evaluaron el efecto de la materia orgánica (Compost) y Biosurfactante (Ácido Húmico) para la biorremediación de sedimentos contaminados con hidrocarburos. Efectuaron 4 tratamientos con sus respectivas repeticiones. La investigación empezó con un valor promedio de 21958 mg/kg de HTP (hidrocarburos totales de petróleo) y presentó una concentración promedio final de 2423.5 mg/kg de HTP, reduciéndose 19534.5 mg/kg HTP con el tratamiento Materia Orgánica 6 lb + Surfactante 4 lb, siendo el tratamiento de mayor eficiencia con 88.96 %.

Muñoz (2016), estudió por tres meses el efecto de *Trichoderma* sp. y *Pseudomona* sp. en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. La contaminación con HTP inicial en el suelo fue 42070.3 mg/kg, al final del ensayo sus tratamientos obtuvieron una remediación eficaz; siendo tratamiento de consorcio (*Trichoderma* y *Pseudomona*) el que degradó más (379.2 mg/kg) teniendo un porcentaje de remoción de un 90.13 %, debido a que ambos microorganismos gozan de los mecanismos necesarios para degradar las moléculas de hidrocarburos, demostrándose que la biorremediación es un proceso ecológico y efectivo para la degradación de hidrocarburos (Muñoz, 2016).

Hernández *et al.* (2017), investigaron por 30 días la capacidad fitorremediadora del pasto *Megathyrus maximus* sobre suelo contaminado con petróleo extra pesado, los resultados mostraron reducción en un 17.1 %.

Bustamante y Silva (2019) evaluaron el efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios, aplicó cachaza de caña de azúcar, compost y cascarilla de arroz. La cachaza de caña de azúcar y compost aceleraron la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo alcanzándose un nivel bajo de toxicidad a los 60 días con la cachaza y 90 días con el compost; con la cachaza la eficiencia de biorremediación fue de 70.48 % a los 90 días.

Velásquez (2017), investigó el efecto del extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo crudo liviano, aplicó un diseño experimental factorial sobre muestras de suelo contaminado con 100 mL por kilogramo de petróleo liviano. Los resultados de sus tratamientos tuvieron efecto estadísticamente significativo con un porcentaje máximo de remoción de petróleo de 90.9 % para una dosis de 150 mL/kg de extracto al 5 % de concentración.

Sachun (2015), realizó un experimento con tratamiento *ex situ* de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método de volatilización natural, utilizó nueve pilas, compuesto por geomembrana de polietileno de alta densidad (3 m²), estos estaban conformados por cada punto de muestreo tres pilas de tratamiento, desarrollados en lugares *in situ*; las pilas de suelos contaminados presentaron tasas de degradación en el rango de 102.02 a 115.69 mg HTP/kg de suelo seco, con porcentaje de reducción de contenido de hidrocarburo entre 98.97 % y 99.75 %.

García (2017), estudió la recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micro-nanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio, donde contaminó 10 kg de suelo franco limoso. Pesó en 4 envases de 2000 gramos de suelo en cada uno y luego contaminó con el petróleo con volúmenes diferentes 133, 267, 400 y 534 ml. Pasado las 48 horas realizó el tratamiento con micro-nanoburbujas. Separó el agua utilizada en t=0, t=2, t=4 y t=8. Para observar una capa fina de petróleo, seguidamente llevó al laboratorio para medir los siguientes parámetros: pH, CE, mv y T; juntamente con ello 4 muestras de suelo tratado para analizar los hidrocarburos totales, el mejor resultado fue la muestra que tuvo 49% de concentración de petróleo en la recuperación del suelo, considerado significativo.

Rodríguez (2018), evaluó el efecto del humus de lombriz en la remediación de suelo contaminado con crudo de petróleo, la investigación fue experimental con un diseño completamente al azar, compuesto por cuatro tratamientos y tres repeticiones por

tratamiento. La investigación consistió en la instalación de 12 celdas experimentales para el tratamiento de suelos contaminado con hidrocarburo, la dosis que mostró mayor índice de disminución de HTP presente en el suelo, fue la de 20 kg de humus de lombriz por 200 kg de suelo contaminado con 1 galón de crudo de petróleo, disminuyendo un 86.74 % de mg de HTP presente en el suelo, comparado al tratamiento sin aplicación de humus que disminuyó un 69.59%, el tratamiento donde se aplicó 10 kg de humus disminuyó 84.33% y el tratamiento donde se aplicó 30 kg de humus disminuyó 75.52%.

Tamayo (2016), estudió el efecto del compost de cáscara de *Citrus limon* sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara. Para el compost aprovechó residuos sólidos orgánicos como materia prima. El diseño que aplicó fue experimental unifactorial, la muestra fue de 9 kg de suelo contaminado con hidrocarburo proveniente de Refinería Talara, el método de procesamiento y análisis de datos para probar las hipótesis fue el análisis de varianza. Observó que el compost de cáscara de *Citrus limon* tuvo efecto positivo en la degradación de hidrocarburos totales de petróleo presentes en dichos suelos, reportando un promedio de 45.26 % de reducción de concentraciones de HTP aplicando 200 g de compost en un período de 50 días.

Muñoz y Pacheco (2017) utilizaron colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa Leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados, realizaron tres tipos de análisis, el primero fue el análisis de varianza para un diseño en bloques completamente al azar (DBCA), de modelo factorial 2A 3B con seis repeticiones (6 maceteros) dando un total de 36 maceteros experimentales (1 kg c/u), el segundo un análisis de varianza con post Hoc Tukey, y por último análisis de regresión lineal simple para determinar la degradación de hidrocarburos por factores ambientales. Los maceteros fueron expuestos a la intemperie durante 180 días. Los resultados mostraron que, el tratamiento con colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn más aserrín de roble más semilla de *Triticum aestivum*, en el suelo contaminado por hidrocarburos C6-C10, en promedio disminuyó 97.4%, siendo el mejor resultado; por otro lado, el contenido C10-C35 disminuyó 92.95 % y el contenido de C10-C28 disminuyó 30%.

VARIABLES DE EXPLORACIÓN

Variables independientes

Suelos degradados

La degradación del suelo se puede definir como todo proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios (Bernad et al., 2017). Se evaluó el nivel de remoción de petróleo según Tabla 1.

Tabla 1. Indicador: capacidad de remoción de petróleo		
Indicador: remoción	valor	Valoración
Total	100 %	5
Significativa	<90 %	4
Moderada	<75 %	3

Deficientemente	<50 %	2
Muy deficient	<20 %	1

La extensión de la pluma de contaminación de un hidrocarburo es mayor cuando el nivel estático se encuentra cerca de la superficie, esto es que la capa de la zona vadosa es delgada; el volumen de adsorción disminuye y la retención decrece (Aceves *et al.*, 2002).

En los suelos degradados se evaluaron a partir del indicador extensión de suelo considerando lo que se detalla en la Tabla 2, la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

Tabla 2. Claves para valoración del indicador: extensión de suelo degradado

Extensión	Valor	Valoración
Grande	10000 m ²	4
Mediana	1000 - 5000 m ²	3
Pequeña	<1000 m ²	2
Micro	10 m ²	1

Emisiones de petróleo

Las emisiones de hidrocarburos ocurren como resultado de la carga y la descarga de camiones/tanque de carga y descarga, vagones tanque y, en algunas refinerías, de buques y barcasas (Guía Ambiental para el Manejo de Emisiones Gaseosas de Refinerías de Petróleo, 2000).

La diferencia en los niveles de emisiones entre convencionales y no convencionales radica esencialmente en la etapa de extracción y procesamiento del hidrocarburo, también existen diferencias notorias en función de las tecnologías utilizadas para la extracción, las particularidades de la geografía y terreno donde se desenvuelven, las distancias desde las fuentes de suministro de los insumos (agua, arena, materiales, etc.) entre otros (Centro Latinoamericano de Ecología Social [CLAES], 2014).

En las emisiones de petróleo se evalúan a partir del indicador nivel de emisión, considerando el detalle que se muestra en la Tabla 3, la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

Tabla 3. Claves para valoración del indicador: emisiones

Emisiones	Valor (barreles de petróleo)	Valoración
Muy grandes	>1000	4
Grandes	1000 – 100	3
Moderadas	100 – 5	2
Pequeñas	<5	1

Variable dependiente: Tratamiento de recuperación de suelos

Se dispone de un amplio abanico de tecnologías de recuperación de suelos contaminados, algunas de aplicación habitual y otras todavía en fase experimental, diseñadas para aislar o destruir las sustancias contaminantes alterando su estructura química mediante procesos generalmente químicos, térmicos o biológicos; su aplicación depende de las características

del suelo y del contaminante, de la eficacia esperada con cada tratamiento, de su viabilidad económica y del tiempo estimado para su desarrollo (Richardson *et al.*, 1999).

En la recuperación de suelos se evalúan a partir del indicador nivel de recuperación con la valoración que se muestra en la Tabla 3, la técnica utilizada fue mediante el análisis de la metadata.

Tabla 3. Clave de valoración del indicador: nivel de recuperación del suelo

Indicador	Recuperación	Valoración
Recuperado totalmente	100 %	5
Aceptan cantidad de activ. biológicas	90 %	4
Aceptan algunas actividades biológicas	75 %	3
Aceptan pocas actividades biológicas	50 %	2
Totalmente degradado	20 %	1

ANÁLISIS DE LA METADATA PARA LAS VARIABLES

En el análisis de la metadata se muestra la información de las variables e información necesaria:

Tratamientos de recuperación de suelos

Clasificación de tecnologías de remediación

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: estrategia de remediación; lugar en que se realiza el proceso de remediación, y tipo de tratamiento (Volke y Velasco, 2004).

A continuación, se describen con más detalle las clasificaciones de las tecnologías de remediación anteriores según (Volke y Velasco, 2004):

Las estrategias que pueden usarse para remediar los lugares contaminados son: Destrucción o modificación de los contaminantes que se basa en la alteración de la estructura química del contaminante, extracción o separación en el cual se extrae o separa el contaminante, aprovechando sus propiedades físicas o químicas, y aislamiento o inmovilización del contaminante en los cuales los contaminantes con el uso de métodos físicos o químicos son estabilizados, solidificados o contenidos.

El lugar del proceso de remediación se distingue dos tipos: *In situ*, es decir que se realiza en el mismo lugar en donde se encuentra la contaminación, y *Ex situ*, es decir que se puede realizar en el mismo sitio o fuera de él.

En el tipo de tratamiento de acuerdo al principio de la tecnología se divide en tres tipos: Tratamientos biológicos o biorremediación en los que se utiliza ciertos organismos para degradar, transformar o remover los contaminantes, tratamientos fisicoquímicos en los cuales se utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación, y tratamientos térmicos en

los que se utiliza el calor para aumentar la volatilización, quemar, descomponer o fundir los contaminantes en el suelo.

Tecnologías tradicionales en donde se utilizan a gran escala, la información de los costos y eficiencia es accesible. Las tecnologías utilizadas son la incineración in situ y ex situ, la solidificación/estabilización, la extracción de vapores y la desorción térmica.

Profundidad de tratamientos

Cuando la contaminación del suelo es más profunda, se emplean sistemas de inyección a través de pozos (Bouwer *et al.*, 2000).

La vitrificación es una técnica especialmente indicada para tratar suelos contaminados poco profundos (Khan *et al.*, 2004).

Identificación y valoración de impactos

Procedimiento técnico que permite interpretar cualitativa o cuantitativamente a través de variables, como escalas de valor fijas que definen los atributos mismos del impacto ambiental, así como el cumplimiento normativo en relación con el aspecto ambiental (Plan Institucional de Gestión Ambiental [PIGA], 2013). En esta revisión se valorizaron los impactos conforme a los criterios que se muestran en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Valoración cualitativa de los impactos

Cualidad	Valor	Valoración
Positivo	3	Gran impacto positivo
	2	Mediano impacto positivo
	1	Poco impacto positivo
Inocuo	0	No genera impacto
Negativo	-1	Poco impacto negativo
	-2	Mediano impacto negativo
	-3	Gran impacto negativo

Tabla 5. Valoración cualitativa de impactos considerando el riesgo en función al insumo

Cualidad	Valor
Insumos naturales	3
Insumos químicos y ecoamigables	2
Insumos químicos	1

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

En la Figura 1 se puede observar que de acuerdo a la evaluación, se eligió cuatro tratamientos: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con un

porcentaje de remoción de 97.4 %, *Trichoderma sp* y *Pseudomona sp* para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con un porcentaje de remoción de 90.13 %, Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo con un porcentaje de remoción de 90.9 %, Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural con un porcentaje de remoción de 99.36 %, por haber obtenido los porcentajes más altos en remediación de suelos contaminados con petróleo crudo. A pesar del alto porcentaje de remoción de los tratamientos para suelos contaminados con petróleo crudo no se recupera a su estado original ni tampoco la biodiversidad del suelo, quedando siempre gran porcentaje degradado que debe continuar siendo recuperado.

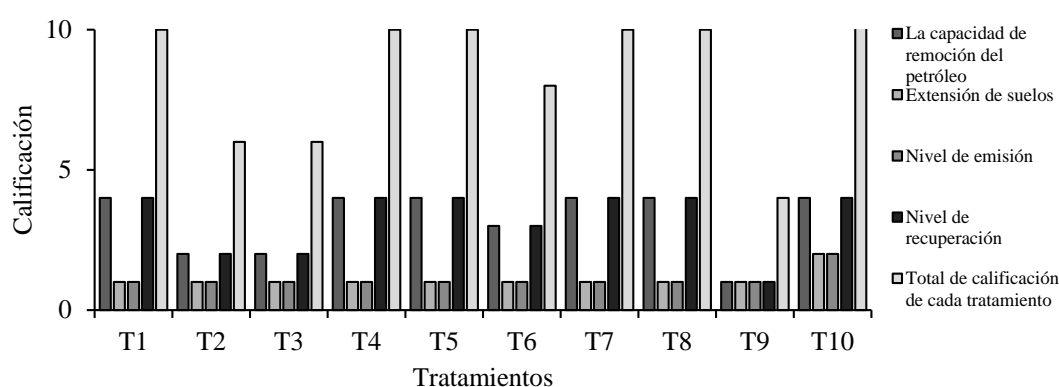


Figura 1. Análisis de los tratamientos. T1: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados. T2: Efecto del compost de cáscara de Citrus limon sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara. T3: Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micronanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio. T4: Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo. Ucayali, Perú. T5: Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio del campamento de Guarumales-CELEC. T6: Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimiento de servicios. T7: Evaluación de la eficacia de *Trichoderma sp* y *Pseudomona sp* para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. T8: Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo. T9: Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*. T10: Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural

ANÁLISIS ENTRE LOS TRATAMIENTOS SELECCIONADOS

En la Figura 2 podemos observar que en el análisis comparativo entre los tratamientos seleccionados para suelos degradados se obtuvo la puntuación final de los tratamientos con respecto a los impactos (positivo y negativo) y riesgos en función al insumo utilizado por parte de ellos, los cuales nos dieron los siguientes resultados: Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo con una puntuación final de 11, teniendo poco impacto negativo por la generación de gases y residuos, usando insumos químicos e insumos amigables con el medio ambiente; Evaluación de la eficacia de *Trichoderma sp.* y *Pseudomona sp.* para

biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con una puntuación final de 11, teniendo poco impacto negativo por la generación de residuos, usando insumos químicos e insumos amigables con el medio ambiente; Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural con una puntuación final de 13, teniendo mediano impacto negativo por la generación de gases y generación de aguas residuales, usando insumos totalmente naturales y Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con una puntuación final de 14, teniendo poco impacto positivo por la incorporación de biodiversidad, usando insumos totalmente naturales.

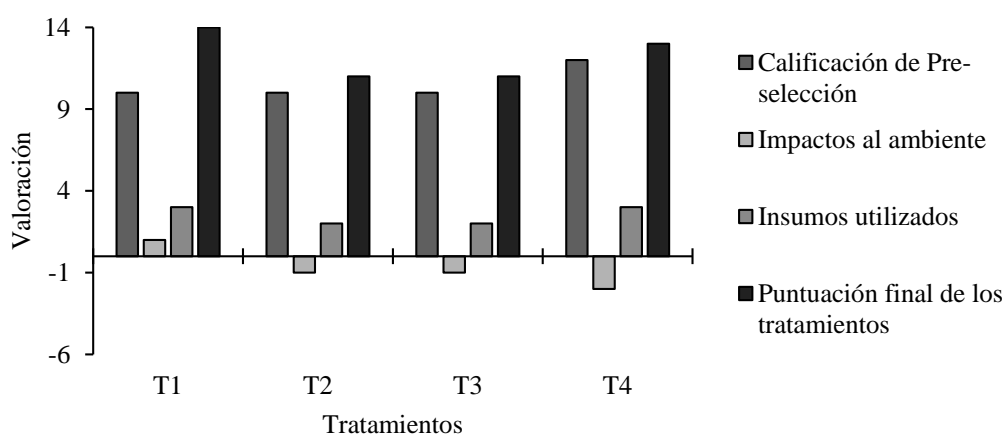


Figura 2. Análisis comparativo entre los tratamientos seleccionados. T1: Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados. T2: Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp. y *Pseudomona* sp. para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. T3: Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo. T4: Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural

CONCLUSIONES

De acuerdo a la revisión, el mejor tratamiento para la recuperación de suelos degradados por vertimiento de petróleo crudo fue el de colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn, responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados con un porcentaje de remoción de 97.4 % y con una puntuación final de 14, teniendo poco impacto positivo por la incorporación de biodiversidad, usando insumos totalmente naturales.

Los demás tratamientos identificados y seleccionados de acuerdo al porcentaje de remoción del petróleo crudo fueron los siguientes: Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp. y *Pseudomona* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con un porcentaje de remoción de 90.13 %, Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana

contaminado con petróleo con un porcentaje de remoción de 90.9 %, Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural con un porcentaje de remoción de 99.36 %, por haber obtenido los porcentajes más altos en remediación de suelos contaminados con petróleo crudo. Estos tratamientos no fueron elegidos como el mejor por la generación de impactos negativos al medio ambiente.

Ningún tratamiento recupera el suelo a su estado original ni tampoco la biodiversidad, por lo tanto, siempre va quedar suelo contaminado que tendrá que seguir siendo tratado.

Referencias

- Aceves, A. A.-M., Peña, G., Puente, M., & Anguas, P. (2002). Metodología para saneamiento de acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos. 196, 55.
- Bustamante, G., & Silva, J. (2019). Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios. 66.
- Bouwer, E. y Rijnaarts, H. y Gerlach R. (2000). Biofilms in porous media. Recuperado de https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/handle/1/13397/00018_Ch5_Biofilms_in_porous_media.pdf?sequence=5
- Centro Latinoamericano de Ecología Social [CLAES]. (2014). Potenciales emisiones de la explotación de hidrocarburos no convencionales. Recuperado de https://www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/foee_esp_overconsumption_0909.pdf
- Comercio. (2016). Perú: Trece derrames de crudo en el Oleoducto Nor Peruano el año 2016 | Noticias El Comercio Perú. El Comercio Perú; Noticias El Comercio Perú. <https://elcomercio.pe/peru/trece-derrames-crudo-oleoducto-nor-peruano-ano-2016-156155-noticia/>
- Flores Barreto, C. S., & Mendoza Sigüencia, J. P. (2017). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos por derrames de la estación de servicio en el campamento de Guarumales-CELEC. 129.
- Friends of the Earth Europe [FoEE]. (2016). ¿Consumimos demasiado? cómo utilizamos los recursos naturales del planeta. Recuperado de <https://fdocuments.es/document/consumimos-demasiado-como-utilizamos-los-recursos-naturales-del-planeta.html>
- García, C. S. (2017). Recuperación del suelo contaminado con petróleo utilizando Micronanoburbujas de aire-ozono a nivel de laboratorio. 87.
- Grados Bueno, C. V., & Pacheco Riquelme, E. M. (2016). El impacto de la actividad extractiva petrolera en el acceso al agua: El caso de dos comunidades kukama kukamiria de la cuenca del Maraón (Loreto, Perú). *Anthropologica*, 34(37), 33-59. <https://doi.org/10.18800/anthropologica.201602.002>
- Guía Ambiental para el Manejo de Emisiones Gaseosas de Refinerías de Petróleo. (2000). Recuperado de <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/regionales/Publicaciones/GUIA%20HIDROCARBUROS%20VIII.pdf>
- Khan, F. I., Husain, T., & Hejazi, R. (2004). An Overview and Analysis of Site Remediation Technologies. *Journal of Environmental Management*. 71:95–122.

- Mujica, F. P., López, H. M., & Zavala, V. M. (2019). Derrames de petróleo y afectación a la salud materno infantil en pueblos indígenas de la amazonía peruana: un análisis exploratorio desde los determinantes de la salud. 96.
- Muñoz Cuaical, S. D. (2016). Evaluación de la eficacia de *Trichoderma* sp Y *Pseudomona* sp para biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. 125.
- Muñoz, J., & Pacheco, M. (2017). Colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa leghorn responsables de la biodegradación de petróleo en suelos contaminados. 91.
- Paneque, A., Gallo, M., & Nuñez, E. (2016). Su influencia en el ser humano, en especial: el sistema re-productor femenino. 7.
- Plan institucional de Gestión Ambienta [PIGA]. (2013). Diligenciamiento de la Matriz de Identificación de aspectos y valoración de impactos ambientales. Recuperado de http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/2426046/INSTRUCTIVO_MATRIZ_EIA.pdf
- Richardson, C., Adams, J., & Reddy, K. (1999). Potential Technologies for Remediation of Brownfields | Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management | Vol 3, No 2.
- Rodríguez, P. (2018). Efecto del humus de lombriz en la remediación de suelos contaminado con crudo de petróleo. Ucayali, Perú. Recuperado de http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4047/000003720T_AMBIENTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sachun, V. R. (2015). Tratamiento ex situ de suelo contaminado por hidrocarburo a través del método volatilización natural. 118.
- SERVINDI. (2017). Se vuelca camión con 700 galones de petróleo en San Martín | Servindi—Servicios de Comunicación Intercultural. <https://www.servindi.org/actualidad-noticias/17/04/2017/camion-que-transpor-taba-700-galones-de-petroleo-se-vuelca-en-san>
- Tamayo, L. N. (2016). Efecto del compost de cáscara de *Citrus limon* sobre la degradación de hidrocarburos totales de petróleo en suelos contaminados provenientes de Refinería Talara. 73.
- Velásquez, M. (2017). Extracto hidroalcohólico de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) como bioestimulador en un suelo de sabana contaminado con petróleo.
- Volke Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2004). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Inst. Nacional de Ecología.