

Tropical contamination by hydrocarbons: Biotechnological perspective for the remediation of soils in forests, application case Peruvian Amazon, Bagua – Imaza

Contaminación por hidrocarburos: Prospectiva biotecnológicas para la remediación de suelos en bosques tropicales, caso aplicativo Amazonía peruana, Bagua – Imaza

Aujasio, L¹., <https://orcid.org/0000-0001-7594-7125>, Cruz, R²., <https://orcid.org/0000-0001-9257-5896>, Sarmiento, S³.,
<https://orcid.org/0000-0002-4915-6335>, Ruiz-Huaman, C⁴., <https://orcid.org/0000-0003-4844-2281>
^{1,2,3,4}Universidad Peruana de Ciencias Aplicada, Perú, U201924091@upc.edu.pe, U202010181@upc.edu.pe,
U202013752@upc.edu.pe, pcicrui@upc.edu.pe

Abstract–*The objective of the present investigation is to publicize the situation of the forests with respect to the contamination of soils by hydrocarbons. The biotechnological processes applied to soil bioremediation and the feasibility of applying them in the country were investigated. Hydrocarbons are the major contaminants due to their resistance to biodegradation and their ability to bioaccumulate in the soil. In the world it is estimated that around 2,381,000 barrels of oil are spilled per year due to spills. Similarly, only in the Peruvian Amazon there have been 566 oil spills and from 1997 to 2021 87,370.82 barrels of oil have been spilled. All this has caused social conflicts and loss of species. In the case of the Bagua province, Imaza district, Inayo annex that crosses the Norperuano Pipeline, many times due to mismanagement, the pipeline has suffered ruptures and subsequent hydrocarbon leaks. The purpose of the study is to publicize in-situ bioremediation techniques, bioventing, bioaugmentation and biostimulation, and ex-situ Technology remediation techniques such as biopiles and landfarming. As well as the phytoremediation technique. The comparative result of the techniques showed the lines of thought that led to the selection of the most appropriate technique for the Amazonian soil of study.*

Keywords– *Remediation, North Peruvian Pipeline, hydrocarbons, ex-situ, in-situ, phytoremediation*

Resumen. - *El objetivo de la presente investigación es dar a conocer la situación de los bosques respecto a la contaminación de suelos por hidrocarburos. Se investigó los procesos biotecnológicos aplicables a la biorremediación de suelos y la viabilidad de aplicarlas en el país. Los hidrocarburos son los mayores contaminantes debido a su resistencia a la biodegradación y su capacidad de bioacumularse en el suelo. En el mundo se estima que se vierten alrededor de 2 381 000 barriles de petróleo por año a causa de los derrames. De forma análoga, solo en la Amazonía peruana han ocurrido 566 derrames de petróleo y que desde 1997 hasta 2021 se han vertido 87 370.82 barriles de petróleo. Todo esto ha causado conflictos sociales y pérdida de especies. En el caso de la provincia de Bagua, distrito de Imaza, anexo Inayo atraviesa el Oleoducto Norperuano, muchas veces por malos manejos, el oleoducto ha sufrido rupturas y posteriores fugas de hidrocarburos. La finalidad del estudio es dar a conocer la biorremediación de las Tecnologías in-situ (bioventing, bioaugmentación y la biostimulación), y las Tecnologías ex-situ (biopilas y landfarming). Como también la técnica de fitorremediación. El resultado comparativo de las técnicas mostro las líneas de pensamiento que dio lugar a la selección de técnica más adecuada para el suelo amazónico de estudio.*

Keywords– *Remediación, Oleoducto Norperuano, hidrocarburos, ex-situ, in-situ, fitorremediación*

I. INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos son contaminantes debido a su resistencia frente a la biodegradación y su capacidad de bioacumularse en los suelos y los cuerpos de agua, afectando así a la flora y a la fauna de muchos lugares del mundo [45]. El riesgo ecológico originado por los hidrocarburos del petróleo (PAH), origina una preocupación generalizada. Los Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) tienen una fuerte toxicidad carcinogénica y teratogénica, y 16 de ellos están catalogados como contaminantes de control prioritario según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). [35.] Desde los años 90, se han producido muchos casos de derrames de petróleo en varios países del mundo. [13], como EE. UU. [20], México [6], Brasil [24], Malasia [1], China [23], Nigeria [45], entre otros países. Ante un derrame de petróleo, se requiere una respuesta para un manejo efectivo que minimice las pérdidas. También implica la necesidad de políticas nacionales, regionales e internacionales para proporcionar derechos de compensación para la parte lesionada, dado que el impacto del petróleo suele ser a largo plazo [1]

La contaminación por derrames de hidrocarburos tales como el petróleo es una problemática a nivel mundial. Se determina que 65 millones de barriles de petróleo son utilizados mundialmente por lo que se evidencia una pérdida de 2 381.000 barriles anuales por derrames desde la fase de explotación hasta el refinado del crudo [1]. En el caso de Perú, se han dado diversos derrames de petróleo en la Amazonía a lo largo de la historia, lo cual ha llevado a que los hidrocarburos se acumulen, contaminando así, los cuerpos de agua, suelos, flora y fauna. Por ejemplo, el último derrame de petróleo más grande que hubo fue el que se dio en Ventanilla por parte de la empresa Repsol donde se vertieron 11 900 barriles de petróleo, directamente afectando así al ecosistema marino. En el caso de la selva, estos derrames ocurren con mayor frecuencia, muchas veces debido al Oleoducto Norperuano el cual transporta el petróleo desde Iquitos hasta Piura. El problema con este Oleoducto es su mantenimiento. Actualmente hay muchos espacios contaminados con hidrocarburos [45]. En la que se utilizan técnicas de biorremediación en suelos y cuerpos de

agua, utilizando plantas o microorganismos con el fin de reducir los contaminantes en los suelos. La biorremediación de suelos se divide en dos, la biorremediación ex-situ y la biorremediación in-situ. En el caso de biorremediación ex-situ se cuentan con las biopilas, landfarming, el compostaje, los lodos activados, entre otros. Para la biorremediación in-situ se puede implementar el uso del bioventing, la bioestimulación, la bioaumentación, fitorremediación, etc. En efecto, la revisión bibliográfica presenta las diferentes alternativas biotecnológicas que puedan servir para posteriores estudios y/o aplicaciones.

A. Objetivo de la revisión

1. Objetivo general

Demostrar la viabilidad de la aplicación de tecnologías para la biorremediación de hidrocarburos en suelos de la Amazonía peruana, Bagua- Imaza

2. Objetivos específicos

- Identificar la problemática en torno a la contaminación por hidrocarburos en la zona la Amazonía peruana con fin de remediarlos.
- Analizar los resultados de los artículos científicos elegidos referentes a la aplicación de técnicas biotecnológicas para la remediación de suelos en bosques tropicales.

II. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA LOCAL

En el Perú el sector hidrocarburos es considerado muy importante para el desarrollo de la economía nacional debido a los altos ingresos que reportan al estado. Sin embargo, la extracción de hidrocarburos provoca una grave contaminación, siendo las provincias amazónicas las más afectadas [21]. Según OEFA y Osinergmin [21], indican que existe una mayor incidencia de derrames en los lotes de la selva, ya que han ocurrido 566 (Figura 1) en tres sitios de extracción petrolera, específicamente en el lote 192 (233) que abarca territorios de las provincias de Datem del Marañón y Loreto; en lote 8 (189) en la provincia de Loreto, pertenecientes a Pluspetrol; y en el Oleoducto Norperuano (111) perteneciente a PetroPerú, que recorren las provincias de Loreto y Amazonas por medio de los tramos I, II y Ramal Norte.

La principal fuente de contaminación por hidrocarburos en Perú es el Oleoducto Norperuano (Corporación Peruana de Petróleos-PetroPerú). Desde 1977 hasta 2016, sus oleoductos sufrieron 61 rupturas y posteriores fugas de hidrocarburos [45]. Se identifica que hasta la fecha la cantidad de barriles derramados han sido 87 370.82 aproximadamente, esto para el caso de productos asociados a la extracción de los hidrocarburos, junto con la suma de 10 020 796 823.73 pies cúbicos de gas fugado en nuestro país [3]. En ese contexto, en la provincia de Amazonas existe una emergencia desde 2011 provocada por el derrame de petróleo del Oleoducto Norperuano.

Con respecto a los casos sobre derrames, el 22 de enero de 2022, el Apu de la comunidad achuar José Olaya reportó un derrame de petróleo en el lote 192 dentro de la base Huayurí que se encuentra ubicada a pocos kilómetros de la comunidad, en el cual la contaminación se extendió dentro del territorio. Otro ejemplo de ello fue el caso ocurrido el pasado 22 de octubre de 2022, donde se registró un derrame de hidrocarburos en el kilómetro 155 del Oleoducto Norperuano, el cual provocó altos niveles de contaminación en el río Wawico, ubicado en el centro poblado Wawico, Aguas Turbias, distrito de Imaza, provincia de Bagua, departamento de Amazonas [45]. Por ende, los conflictos socioambientales son causados principalmente por actividades industriales que generan la contaminación del suelo, puesto que se utilizan sustancias que, por su estructura química, reactividad y cantidad, descomponen las propiedades específicas del suelo y afectan sus funciones básicas (como la productividad, el modo de producción); saneamiento, corte de agua, mantenimiento de la cubierta vegetal y climatización.

Por consiguiente, esta situación es considerada como una emergencia ambiental, ya que se evidencia la afectación a la calidad de vida de la población y de los recursos naturales de la zona afectada. Los suelos y sedimentos contaminados con petróleo suelen contener una mezcla de hidrocarburos aromáticos policíclicos, que se ha demostrado que causan carcinógenos en animales y humanos, incluidos el benzopireno, el antraceno y el fluoranteno. Por lo que, dichos contaminantes provocan una alteración negativa en el medio ambiente, puesto que ocasiona cambios en las cadenas tróficas, pérdida de hábitats y especies tales como flora y fauna local [54].

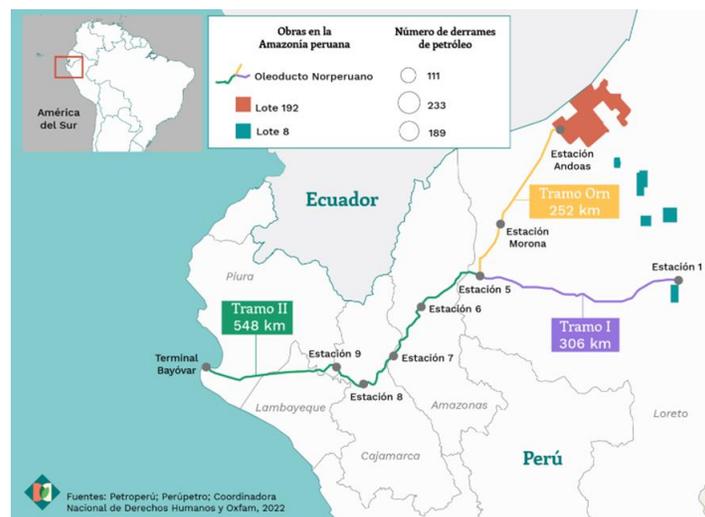


Fig. 1. Recorrido que realiza el Oleoducto Norperuano para trasladar hidrocarburos de la Amazonía hasta la Costa del Perú.

Fuente: Memoria anual Petroperú 2020”, por Petroperú.

III. EL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada tiene origen en el Anexo Inayo, distrito de Imaza, provincia de Bagua, Amazonas, Perú. En dicha zona pasa el Oleoducto Norperuano, el cual se encarga de transportar petróleo crudo desde la selva peruana hasta el terminal de Bayóvar ubicado en la costa norte del Perú. Se ubica en la margen izquierda de la quebrada Inayo, afluente del río Chiriaco, en las coordenadas geográficas 5°11'0.1" latitud sur, 78°18'23" longitud oeste. La zona de estudio está clasificada como bosque muy húmedo, premontano tropical. El distrito de Imaza, se caracteriza por presentar una temperatura promedio anual de 24.9 °C, con precipitaciones que oscilan hasta los, 2690.9 mm/año. En cuanto a su paisaje, este presenta una geomorfología de montañas altas calcáreas mesozoicas con elevaciones que superan los 1000 m de altitud, relieves de laderas moderadamente empinadas y alargadas, con colinas algo suaves y caprichosas [24].

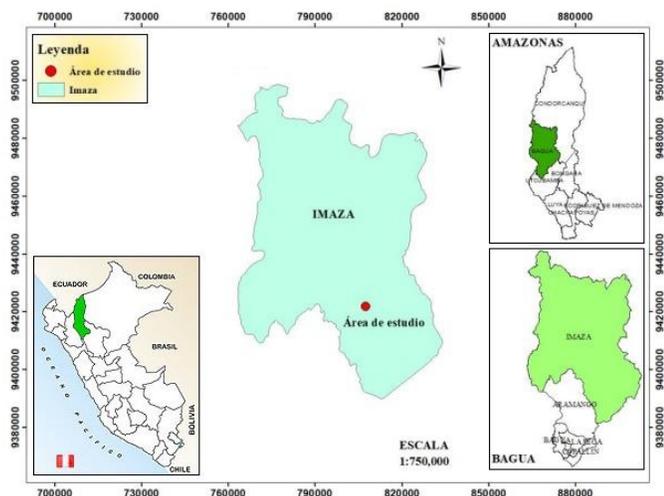


Fig. 2. Ubicación del área de estudio, donde se aplicarán las tecnologías escogidas para la recuperación del suelo [45].

El 25 de enero de 2016, en el Km. 440+781 del Tramo II del Oleoducto Norperuano (área de estudio), se presentó una falla en la tubería que transportaba el crudo de 36 pulgadas de diámetro, resultando en una fuga de petróleo que corrió y penetró en el suelo, afectando a las plantas de cacao, plátanos y vegetación típica de la zona. Además, las áreas aledañas (la quebrada Inayo y el río Chiriaco) también fueron afectadas [24].

Según una caracterización de suelos realizada en una zona agrícola afectada por derrame de hidrocarburos en el área de estudio, determina que sus suelos se distinguen por ser arcillosos-arenoso y franco-arcillosos-arenosos, lo que determina que cuentan con permeabilidad moderada, presentando dificultades para el filtrado del agua, oxígeno y nutrientes. Asimismo, son suelos en donde predomina la arena y arcilla, por lo que reflejan una mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC). Los valores de CIC conseguidos, son valores medios, es decir, que se encuentran entre 5 a 15, lo que determina que el suelo tiene una mediana retención de nutrientes. El porcentaje de

materia orgánica (M.O.) oscila de 1.3 a 2.8% evidenciando una presencia baja de M.O. El 50% del volumen del suelo en estudio aproximadamente es de tipo poroso [45].

IV. EVALUACIÓN DE REVISIÓN TÉCNICA

Comparación de las diferentes técnicas de biorremediación.

TABLA 1
Tipos de Biorremediación

Técnicas	Tecnologías in-situ			Tecnologías ex-situ	Fitorremediación
	Bioventilación	Bioaumentación	Bioestimulación	Landfarming	Fitovolatilización
Tipo de suelo	Ultisol y oxisoles [1].	Aridisol, entisol, ultisol, inceptisol y oxisol [1].	Alfisol y molisol [1].	Aridisol, entisol, alfisol, molisol y inceptisol [1].	Inceptisol [1].
Volumen del área impactada	Apto para tratar áreas de gran a pequeña escala [21].			Grandes volúmenes de suelo [21].	Áreas de emplazamiento extensas [21].
Pronóstico o del estado de tiempo y clima	Mejor rendimiento en climas húmedos, tropicales y cálidos con amplio rango de temperaturas [14].			-Sistema de riego de 50 a 60% de humedad [21]. -Se emplea en gran variedad de condiciones climáticas [9].	Zonas con poca precipitación dependiendo del tipo de especie emplazada [9].
Costo de implementación	De 10 a 70 USD/m ³ [21].	Asociado a la fuente de carbono a emplear y a la disponibilidad de recursos en la zona a remediar [21].	De 30 a 100 USD/m ³ [21].	100 USD/m ³ [21].	De 24 000 a 40 000 USD/ha. [21].
Mantenimiento/logística	-No necesita excavación [14]. -Usado en áreas de difícil acceso [14]. -Requiere de equipos disponibles para insuflar el aire y mantener su circulación constante [2].	-Requiere el aislamiento de cultivos previos de microorganismos especializados [22]. - Suministro adecuado de nutrientes, condiciones de humedad y temperatura para el desarrollo de los microorganismos [8].	-No requiere de excavación traslado de suelo, ni empleo de maquinaria pesada [14]. -Adición de enmiendas para estimular el metabolismo de microorganismos [12]. -De manera simultánea se trata el agua subterránea y suelo [5], [32].	-Excavación y construcción de celdas de tratamiento [6]. -Requiere de áreas espaciales de instalación [6]. -Volteo mecánico periódico del suelo [15].	-Se realiza en lugares alejados de la población [34], [9]. -Requiere de energía solar [21], [23].

Tiempo de tratamiento	6 meses a 2 años bajo condiciones óptimas [21].	Mediano y corto plazo [21].	Largo plazo [21].	Mediano o largo plazo [21].	Proceso lento según las condiciones de crecimiento de la especie [54].
Impacto ambiental	Se trabaja en la zona saturada [2].	Mejora el proceso de nitrificación [18].	Se trabaja en la zona saturada [18].	No genera emisiones [54].	Recicla los recursos [24].

Fuente:² Cruz R

V. VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS EN PERÚ.

Tabla 2, muestra algunos continentes, los cuales se presentaron por países, clasificando el tipo de suelo y bosque, y a su vez el sustento de la tecnología apropiada a utilizar.

TABLA 2
Tipos de suelos y bosque para la tecnología a aplicar

Continente	País	Tipo de suelo	Tipo de bosque	Tecnología a utilizar
América	Perú	Leptosol, Cambisol, Regosol, Calcisol, etc. [33]	Bosque de podocarpus, bosque seco de montaña, bosque de montañas, etc. [45]	Bioventing, bioaumentación, bioestimulación y landfarming
	Colombia	Entisoles, inceptisoles y ultisoles [8]	húmedo tropical, seco, andino, de galería y de manglar [12]	Bioventing, bioaumentación, bioestimulación y fitovolatilización
	México	leptosoles, regosoles, calcisoles [10]	bosque mesófilo de montaña, selva perennifolia, selva caducifolia, selva espinosa, etc. [15]	Bioventing, bioaumentación, bioestimulación y landfarming
	Ecuador	Andosoles, alfisoles, oxisoles [51]	Bosque húmedo tropical amazónico, Bosque húmedo tropical del Chocó, Bosque Montano Oriental [34]	Bioventing, bioaumentación, bioestimulación y landfarming
África	Nigeria	arenosoles, ferrasoles, luvisoles, acrisoles [27]	Bosque pantanoso de agua dulce, bosque lluvioso de tierras bajas, sabana derivada, sabana de Guinea. [11]	Bioventing, bioaumentación, bioestimulación y landfarming.
Asia	Malasia	Litosoles, podsoles,	bosque seco interior, el bosque	Bioventing, bioaumentación,

		gleysoles, etc [54]	pantanoso de turba, los manglares y la plantación forestal [28]	bioestimulación y landfarming
	India	antrosol, fluvisol, lixisol, plintisol, umbrisoles [13]	Bosques tropicales semiperennifolios, Bosques Húmedos Tropicales perennifolios [12]	Bioventing, bioaumentación, bioestimulación y landfarming

Fuente:³ Sarmiento S

Tabla 3, presenta la aplicación de la técnica de estudio en propuesta en el Anexo Inayo, distrito de Imaza, provincia de Bagua, Amazonas, Perú. Después de un minucioso estudio técnico, se fundamentó las técnicas apropiadas de biorremediación a utilizar.

TABLA 3
Evaluación de técnicas para su aplicación en el área de estudio

Técnica	Tipo de suelo	¿Es aplicable?	Fundamento
Bioventing	Ultisol y oxisoles	Si	Porque posee un nivel de efectividad medio alto debido a que esta técnica no requiere introducir microorganismos exógenos, ni de parámetros ambientales específicos, además que los bajos costos de su implementación hacen que sea una buena opción para la remediación de los suelos.
Bioaumentación	Aridisol, entisol, ultisol, inceptisol y oxisol	No	Porque al ser La Tecnología in-situ es de difícil aplicación, ya que los medios porosos de grano fino, son filtros muy eficaces para las células microbianas, debido a que los cultivos antes de crecer trabajosamente podrán transportarse a zonas vadadas.
Bioestimulación	Alfisol y molisol	Si	Porque posee un nivel de efectividad medio alto debido a que estas tecnologías funcionan con una concentración de hidrocarburos baja, como la que existe en el lugar de estudio, además que esta técnica es muy adaptable a las condiciones climáticas, y su implementación no requiere de mucha maquinaria.
Landfarming	Aridisol, entisol, alfisol, molisol y inceptisol	No	Debido a su bajo nivel de efectividad en comparación con otras técnicas, además se necesita la disponibilidad de los tallos de algodón en las zonas de la Amazonía, y no cuenta con las parcelas necesarias para su cultivo.
Fitorremediación	Inceptisol	No	Debido a que esta técnica para su crecimiento necesita de condiciones climatológicas e hidrológicas específicas, además que el proceso de crecimiento es lento.

Fuente:¹ Aujasio L

La tabla 4, presenta la selección y la manera de utilizar de las dos técnicas propuestas en el área de estudio.

TABLA 4
Selección de técnicas para su aplicación en el área de estudio

Técnica	¿Por qué se utilizará?	Tipo de suelo	¿Es aplicable?	¿De qué manera se utilizará?
Bioventing	Posee un nivel de efectividad medio alto debido a que la inyección de oxígeno ha probado que estimula las bacterias autóctonas del suelo mejorando así la degradación natural de hidrocarburo. No necesita excavación, puede ser usado en áreas de difícil acceso y equipos disponibles, es por ello que se determinó usar esta técnica por su efectividad, fácil implementación y bajo costo.	Ultisol y oxisol	Sí porque esta técnica no requiere introducir microorganismos aerobios que se encuentran en el suelo mediante la inyección de aire. Además, que los bajos costos de su implementación hacen que sea una buena opción para la remediación de los suelos, y se puede aplicar de manera masiva lo cual no supone un gran costo, ya que se utilizaría la misma maquinaria.	A través de la estimulación de los microorganismos aerobios que se encuentran en el suelo mediante la inyección de aire.
Bioestimulación	Porque posee un nivel de efectividad medio alto debido a que estas tecnologías funcionan con una concentración de hidrocarburos baja, la cual la hace que esta técnica sea la más adecuada para su implementación.	Alfisol y molisol	Si es aplicable, ya que esta técnica es muy adaptable a las condiciones climáticas, y su implementación no requiere de mucha maquinaria, por tanto, el acceso a las zonas contaminadas no representará un problema.	Mediante la adición de nutrientes orgánicos, etc. para promover las funciones metabólicas.

Fuente:¹ Aujasio L

TABLA 5
Propuesta modelo para ejecución del proyecto de biorremediación

Nº	Etapas	Actividades	Periodo de ejecución 127 días
I	Acciones de respuesta rápida	-Establecer puntos de control: ubicación. -Inspección de tuberías de oleoducto. -Recolección de petróleo.	2 días
II	Construcción de facilidades	-Implementación y construcción de espacios, accesos, almacenes, etc. para el proceso de biorremediación.	12 días
III	Desbroce de material	-Retiro del material vegetal contaminado y no contaminado.	22 días
IV	Limpieza y recuperación	-Labores de adecuación. -Retiro del material hacia los puntos de acopio y lavado.	44 días
V	Biorremediación in situ	Biorremediación de suelo: -Implementación de celdas de tratamiento. -Desarrollo de actividades de remoción y localización del material. -Remoción del suelo y traslado al punto inicial. -Realizar procesos de homogenización y oxigenación. -Aplicación de agentes y productos. -Aplicación de las tecnologías de bioventing y/o bioestimulación.	35 días
VI		Biorremediación de quebradas y cuerpos de agua: -Proceso de rascado y lavado de piedras. -Evacuación de residuos de limpieza.	
VII		Control de calidad y seguimiento: -Seguimiento continuo. -Control de los niveles de hidrocarburos. -Realizar informes de restablecimiento de suelos.	
VIII		Monitoreo de la matriz del suelo: -Análisis de los resultados obtenidos de los puntos de monitoreo. -Comparación con los ECAs del suelo.	
IX		Monitoreo de la matriz del sedimento: -Evaluación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP).	
X		Reincorporación del suelo: -Reincorporación del suelo después de ser sometido a procesos de biorremediación.	
XI	Restauración de áreas: -Predomina las condiciones iniciales del suelo.		
XII	Extracción y retiro del material impactado		10 días
XIII	Desmontaje de facilidades		2 días

Fuente:² Cruz R

VI. CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica demostró resultados positivos en cuanto a la remoción de hidrocarburos de los suelos mediante el uso de Tecnologías in- situ y Tecnologías ex - situ tales como el bioventing, bioestimulación, bioaumentación, landfarming y fitorremediación. Sin embargo, en el caso del área de estudio, se evidencia la factibilidad del empleo de técnicas de bioventing y/o bioestimulación con el objetivo de garantizar las medidas correctivas del suelo, teniendo en cuenta su morfología, relieve, etc.

En primera instancia, la biorremediación in situ por **bioventing** es un método posible para degradar hidrocarburos y tiene un alto nivel de eficacia, ya que la inyección de oxígeno ha demostrado que estimula las

REFERENCES

- [1] "(1622) MODELOS Y TECNOLOGÍAS DE RESPUESTA A DERRAMES Y REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS - YouTube." https://www.youtube.com/watch?v=_ENjhhyNeQ&ab_channel=Petroperer%20C3%20BAS.A. (accessed Feb. 20, 2023).
- [2] A. Hussain *et al.*, "In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air – A review," *Chemosphere*, vol. 289, p. 133252, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.133252.
- [3] A. León and M. Zúñiga, "La sombra de los hidrocarburos en el Perú." https://oi-files-eng-prod.s3.amazonaws.com/peru.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/La-sombra-de-los-hidrocarburos-en-el-Peru%20CC%81.pdf (accessed Nov. 22, 2022).
- [4] A. MARTÍNEZ-PRADO, Ma. E. PÉREZ-LÓPEZ, J. PINTO-ESPINOZA, B. A. GURROLA-NEVÁREZ, and A. L. OSORIO-RODRÍGUEZ, "Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes," *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 27, no. 3, pp. 241–252, 2011, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009&lng=es&nrm=iso&tng=es
- [5] B. A. Cerna Apaza, "Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos usando el hongo *Penicillium janthinellum* en los servicios generales de la UNALM – La Molina, 2018," *Universidad César Vallejo*, 2018, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32555>
- [6] D. C. Zacharias, C. M. Gama, and A. Fornaro, "Mysterious oil spill on Brazilian coast: Analysis and estimates," *Mar Pollut Bull*, vol. 165, p. 112125, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112125.
- [7] D. M. Brown *et al.*, "Comparison of landfarming amendments to improve bioremediation of petroleum hydrocarbons in Niger Delta soils," *Science of The Total Environment*, vol. 596–597, pp. 284–292, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.04.072
- [8] D. Malagón, "LOS SUELOS DE COLOMBIA" IGAC, s.f. <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/05loss.pdf>
- [9] D. Soto-Oñate and G. Caballero, "Oil spills, governance and institutional performance: The 1992 regime of liability and compensation for oil pollution damage," *J Clean Prod*, vol. 166, pp. 299–311, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.CLEPRO.2017.08.021.
- [10] E. Sotelo, G. Cruz, A. González, R. Flores, "Actualización de la cartografía edafológica del Estado de México: una herramienta para la planeación" Campo Experimental Metepec-INIFAP, 2020, <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/648/1/Actualizaci%C3%B3n%20de%20la%20cartograf%C3%ADa%20edafol%C3%B3gica%20del%20Estado%20de%20M%C3%A9xico%20una%20herramienta%20para%20la%20planeaci%C3%B3n.pdf>.
- [11] FAO "Land use/Land Cover and Forest Cover Mapping in Nigeria" FAO, 2020, <https://www.fao.org/3/cb1327en/cb1327en.pdf>
- [12] Fondo Mundial para la Naturaleza Colombia (WWF Colombia) "Bosques" Fondo Mundial para la Naturaleza, 2020, https://www.wwf.org.co/que_hacemos/bosques/
- [13] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps" nformation Division, 2015, <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>
- [14] G. Sales da Silva, F. C. Gomes de Almeida, N. M. Padilha da Rocha e Silva, A. A. Casazza, A. Converti y L. Asfora Sarubbo, "Soil Bioremediation: Overview of Technologies and Trends," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4664, vol. 13, no. 18, p. 4664, Sep. 2020, doi: 10.3390/EN13184664.
- [15] Gobierno de México "Bosques de México, riqueza forestal y biodiversidad" Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021, <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-de-mexico-riqueza-forestal-y-biodiversidad?idiom=es#:~:text=Hay%20suficiente%20raz%C3%B3>

bacterias autóctonas del suelo, lo que mejora la degradación natural de hidrocarburos y reduce aún más el costo, por tal motivo, no es necesario introducir microorganismos exógenos ni parámetros ambientales específicos. Por otro lado, debido a que se conocen las características del suelo del área de estudio, esta tecnología es factible mediante las inyecciones de oxígeno por intervalos. Además, al ser de costo reducido, su instalación no requiere de un gran espacio y no se modifican las propiedades morfológicas y físicas del suelo.

En segunda instancia, la biotecnología de **bioestimulación** es un método para degradar los hidrocarburos y posee un alto nivel de efectividad, debido a que esta tecnología opera con una concentración baja de hidrocarburos, como la que existe en el sitio de estudio. Asimismo, otra de las ventajas de la utilización de la tecnología de bioestimulación, es que funciona en suelos compuestos principalmente por arcilla y se adapta a la temperatura y condiciones de la selva. Esta técnica no requiere de gran cantidad de maquinaria, por lo tanto, el acceso a la zona contaminada no será un gran problema.

Finalmente, se descarta el uso de las técnicas de bioaumentación, landfarming y fitorremediación, ya que su aplicación en el área de estudio resulta difícil. Esto significa que es necesario evaluar una gran cantidad de factores adicionales, tales como el acceso al sitio contaminado, los equipos y maquinaria necesarios, el tiempo que se requiere para producir microorganismos inóculos y el periodo de crecimiento de especies vegetales para obtener resultados factibles.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo estudios sobre los tipos de suelos y bosques de los diferentes países para obtener información actualizada y mejorar las diferentes tecnologías de recuperación del suelo. De este modo, se podría realizar de manera más efectiva y minimizar los impactos ambientales, ya que existe un alto porcentaje de contaminación por hidrocarburos en los diferentes países analizados. Asimismo, según el documento presentado, se recomienda que profesionales de diferentes áreas puedan contribuir a la investigación sobre la contaminación por hidrocarburos en la Amazonía Peruana. De modo que el proyecto pueda llevarse a cabo con las tecnologías mencionadas y, al mismo tiempo, con un equipo profesional que permita obtener resultados favorables.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Peruana de Ciencias Aplicada (UPC), por el apoyo y motivación a los estudiantes, buscando soluciones biotecnológicas en los lugares impactados de nuestra Amazonía peruana.

- [n%20para%20sostener.%2C%20vegetaci%C3%B3n%20hidr%C3%B3fila%2C%20atorral%20xer%C3%B3filo%2C](#)
- [16] I. Hernández Valencia, G. Navas, and C. Infante, "FITORREMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO EXTRA PESADO CON *Megathyrus maximus*," 2017. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RI CA.2017.33.03.12/46705> (accessed Nov. 22, 2022).
- [17] J. A. Marengo *et al.*, "Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 6, p. 228, Dec. 2018, doi: 10.3389/FEART.2018.00228/BIBTEX.
- [18] J. D. Villena Vergara, "Efecto de la aplicación de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales en el proceso de biorremediación de un suelo contaminado por combustible diésel," *Universidad Científica del Sur*, 2019, Accessed: Feb. 14, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/827>
- [19] J. L. Mego Meléndez, "Caracterización de suelos afectados por hidrocarburos en una zona agrícola del distrito Imaza, región Amazonas," *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, vol. 4, no. 2, p. 48, Aug. 2021, doi: 10.25127/ucni.v4i2.727
- [20] J. L. Ramseur, "Oil Spills: Background and Governance Specialist in Environmental Policy," Congressional Research Service: Washington, DC, USA, 2017 [Online]. Available: www.crs.gov
- [21] J. R. Candia, "Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados", Gerente de Agua & Medio Ambiente, *Fundación Chile*, 2019, https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf
- [22] J. Tranca, "En Perú, los derrames de petróleo manchan a la Amazonía peruana. ¿Por qué se actúa tan lentamente?," May 10, 2022. <https://dialogochino.net/es/actividades-extractivas-es/53777-en-peru-los-derrames-de-petroleo-manchan-a-la-amazonia-por-que-se-actua-tan-lentamente/> (accessed Nov. 22, 2022).
- [23] J. Velásquez, "Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación," *Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, no. 1, Jun. 2017, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2227>
- [24] K. E. Yóplac, O. Tuesta, E. Pariente, and W. Guzmán, "Prospección de especies arbóreas para la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, Amazonas, Perú," *Revista Forestal del Perú*, vol. 35, no. 1, pp. 31–41, Jul. 2020, doi: 10.21704/RFP.V35I1.1474.
- [25] K. Ramirez and V. Yarleque, "Técnicas de biorremediación y su aplicación en suelos contaminados con hidrocarburos," Universidad Privada del Norte, Trujillo, 2022. Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30432>
- [26] L. Panchenko, A. Muratova, E. Dubrovskaya, S. Golubev, and O. Turkovskaya, "Dynamics of natural revegetation of hydrocarbon-contaminated soil and remediation potential of indigenous plant species in the steppe zone of the southern Volga Uplands," *Environmental Science and Pollution Research* 2017 25:4, vol. 25, no. 4, pp. 3260–3274, Nov. 2017, doi: 10.1007/S11356-017-0710-Y.
- [27] Land and Water Development Division, FAO, "Soil map of Nigeria. Based on the soil map of Africa by C.C.T.A" 1964, <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-map-nigeria-based-soil-map-africa-ccta>
- [28] M. Bin Hussein, "RECREATIONAL FOREST LANDSCAPE DEVELOPMENT: A STRATEGY FOR MANAGING FOREST RESOURCES IN SUSTAINABLE MANNER IN MALAYSIA" University Putra Malaysia, 2020, https://www.researchgate.net/publication/263165213_RECREATIONAL_FOREST_LANDSCAPE_DEVELOPMENT_A_STRATEGY_FOR_MANAGING_FOREST_RESOURCES_IN_SUSTAINABLE_MANNER_IN_MALAYSIA.
- [29] M. Guerrero-Useda, "Equilibrio ambiental, extracción petrolera y riesgo de desastres en el oleoducto transandino colombiano," *IPSA Scientia, revista científica multidisciplinaria*, vol. 6, no. 3, pp. 86–101, Aug. 2021, doi: 10.25214/27114406.1113.
- [30] M. Pérez, "Evaluación de la biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos utilizando *pseudomonas fluorescens*," 2018, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15446>
- [31] M. Sakari *et al.*, "Urban vs. Marine Based Oil Pollution in the Strait of Johor, Malaysia: A Century Record," <http://dx.doi.org/10.1080/15320383.2010.515630>, vol. 19, no. 6, pp. 644–666, 2010, doi: 10.1080/15320383.2010.515630.
- [32] MINAM, "Guía para la elaboración de los Planes de Descaminación de Suelos", 2014, https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-PDS-SUELO_MINAM2.pdf.
- [33] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, "Asociación de Suelos" Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, s.f., https://www.midagri.gob.pe/portal/imagenes/minag/rmn_mapasuelos.jpg.
- [34] Museo de zoología QCAZ, *amphibiaweb*, BIO WEB ECUADOR, JRS Biodiversity Foundation, "Regiones Naturales" PUCE, 2020, <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/RegionesNaturales>
- [35] N. Elsayed and S. Ammar, "Sustainability governance and legitimisation processes: Gulf of Mexico oil spill," *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 253–278, Jan. 2020, doi: 10.1108/SAMPJ-09-2018-0242/FULL/PDF
- [36] N. Yavar Ashayeri, B. Keshavarzi, F. Moore, M. Kersten, M. Yazdi, and A. R. Lahijanzadeh, "Presence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and surface water from Shadegan wetland – Iran: A focus on source apportionment, human and ecological risk assessment and Sediment-Water Exchange," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 148, pp. 1054–1066, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.ECOENV.2017.11.055.
- [37] O. Egbon and C. O. Mgbame, "Examining the accounts of oil spills crises in Nigeria through sensegiving and defensive behaviours," *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, vol. 33, no. 8, pp. 2053–2076, Nov. 2020, doi: 10.1108/AAAJ-12-2018-3794
- [38] O. N. Albert, D. Amaratunga, and R. P. Haigh, "Environmental Policies within the Context of Compensation for Oil Spill Disaster Impacts: A Literature Synthesis," *Procedia Eng*, vol. 212, pp. 1179–1186, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROENG.2018.01.152.
- [39] Osinergmin, *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú*. Lima, 2017. Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Libro-industria-hidrocarburos-liquidos-Peru.pdf
- [40] P. G. Cárdenas Moscol, R. Cabello Torres, L. Valdiviezo Gonzales, and R. Munive Cerrón, "Bioestimulación de bacterias autóctonas con adición de enmiendas en la degradación de cadenas hidrocarbonadas de suelos contaminados en la Refinería de petróleo Conchan en Lima-Perú, 2017," *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, ISSN 0120-4211, Vol. 15, N° 2, 2017, págs. 16-20*, vol. 15, no. 2, pp. 16–20, 2017, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6939024&info=resumen&idioma=SPA>
- [41] PUNAMUDT, "MIENTRAS TODOS SE MUEVEN EN VENTANILLA, LA SELVA SIGUE SIENDO OLVIDADA," Jan. 23, 2022. <https://observatoriopetrolero.org/mientras-todos-se-mueven-en-ventanilla-la-selva-sigue-siendo-olvidada/> (accessed Nov. 22, 2022).
- [42] R. A. V. García, A. E. P. Barrera, C. W. T. Taco, and M. M. M. Padilla, "Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos," *Rev Lasallista Investig*, vol. 17, no. 1, pp. 177–187, 2020, doi: 10.22507/RLI.V17N1A19.
- [43] R. M. Suarez, "GUÍA DE MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS." Instituto de Postgrados Ingeniería, Especialización en Gerencia Ambiental, Bogotá, 2013 <https://docplayer.es/73630680-Guia-de-metodos-de-biorremediacion-para-la-recuperacion-de-suelos-contaminados-por-hidrocarburos-roland-mauricio-suarez-beltran.html> (accessed Feb. 14, 2023).
- [44] R. T. C. Rogel, F. J. M. Calero, M. C. la Torre, J. N. F. Ponce, and E. L.-M. Matonnier, "Aislamiento de bacterias con potencial

- biorremediador y análisis de comunidades bacterianas de zona impactada por derrame de petróleo en Condorcanqui (Amazonas, Perú),” *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 22, no. 3, pp. 215–225, Sep. 2020, doi: 10.18271/RIA.2020.656.
- [45] Redacción Gestión “Estos son los siete tipos de bosques existentes en el territorio peruano” *Gestión*, 2021, <https://gestion.pe/peru/estos-son-los-siete-tipos-de-bosques-existentes-en-el-territorio-peruano-noticia/>
- [46] S. Curiel-Alegre *et al.*, “Evaluation of biostimulation, bioaugmentation, and organic amendments application on the bioremediation of recalcitrant hydrocarbons of soil,” *Chemosphere*, vol. 307, p. 135638, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135638.
- [47] S. Kuppusamy, N. R. Maddela, M. Megharaj, and K. Venkateswarlu, “Approaches for Remediation of Sites Contaminated with Total Petroleum Hydrocarbons,” *Total Petroleum Hydrocarbons*, pp. 167–205, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-24035-6_7.
- [48] S. Reddy, et al, “Nationwide Assessment of Forest Burnt Area in India Using Resourcesat-2 AWiFS Data” ational Remote Sensing Centre, Indian Space Research Organisation, 2020, https://www.researchgate.net/publication/315835800_Nationwide_Assessment_of_Forest_Burnt_Area_in_India_Using_Resourcesat-2_AWiFS_Data
- [54] W.P. Panton, “Soil map of Malaya 1962” Division of Agriculture. Survey Department Federation of Malaya, 1962, https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/EuDASM/Asia/images/maps/download/MY2000_SOTO.jpg
- [55] X. Song, C. Li, and W. Chen, “Phytoremediation potential of Bermuda grass (*Cynodon dactylon* (L.) pers.) in soils co-contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons and cadmium,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 234, p. 113389, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ECOENV.2022.113389.
- [56] Y. Ccolque Choque and A. F. Vargas Molina, “Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP’S) mediante el Método de Biopilas con dos Tipos de Sustrato (Tierra y Abonos Orgánicos),” *Universidad Católica de Santa María - UCSM*, Oct. 2017, Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/6745>
- [57] Y. Wang, X. Liu, Y. Sun, H. Lian, and X. Tang, “Identification of Oil Spill from Imported Crude Oils in China Using GC/IrMS”, *Environ. Forensics* 2013, 14, 306–311.
- [49] S. Wang, X. Wang, C. Zhang, F. Li, and G. Guo, “Bioremediation of oil sludge contaminated soil by landfarming with added cotton stalks,” *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 106, pp. 150–156, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.IBIOD.2015.10.014.
- [50] S. Yavari, A. Malakahmad, and N. B. Sapari, “A Review on Phytoremediation of Crude Oil Spills,” *Water, Air, & Soil Pollution* 2015 226:8, vol. 226, no. 8, pp. 1–18, Aug. 2015, doi: 10.1007/S11270-015-2550-Z.
- [51] SIGTIERRAS, Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica “Mapa de órdenes de suelos del Ecuador” Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017, http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/MEMORIA_MAPA_DE_ORDENES_DE_SUELOS_MAG_SIGTIERRAS.pdf
- [52] T. S. Spezio, “The Santa Barbara Oil Spill and Its Effect on United States Environmental Policy,” *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 2750, vol. 10, no. 8, p. 2750, Aug. 2018, doi: 10.3390/SU10082750.
- [53] V. C. Vélez Jiménez and X. Vélez Gavilanes, “Evaluación de bacterias y hongos potencialmente utilizables para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos,” Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, 2020. Accessed: Nov. 22, 2022. [Online]. Available: <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/JIMENEZ%20VELEZ%20VILMA%20CECIBEL.pdf>