



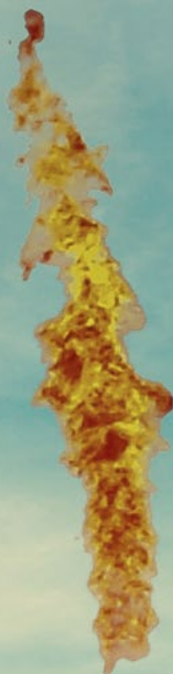
Religación
Press

Wilmer Arevalo Nima
Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocsas
Jonathan Wilson Sancarranco Estela
Gohan Augusto Chiroque Gómez
Miguel Humberto Apon Trelles

BAJO LA SOMBRA DEL PETRÓLEO

**Evaluación ambiental y estrategias
de recuperación de suelos
en la Amazonía peruana**

Ingeniería



Wilmer Arevalo Nima, Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocsas,
Jonathan Wilson Sancarranco Estela, Gohan Augusto Chiroque Gómez,
Miguel Humberto Apon Trelles

Bajo la sombra del petróleo

*Evaluación ambiental y estrategias de
recuperación de suelos en la Amazonía peruana*

Religación Press
[Ideas desde el Sur Global]

*Under the shadow of oil.
Environmental assessment and soil recovery strategies in the
Peruvian Amazon*

*À sombra do petróleo.
Avaliação ambiental e estratégias de recuperação de solos na
Amazônia peruana*

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial

Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahi Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial

Editorial Board

Jean-Arsène Yao

Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova

Fabiana Parra

Frisa María Antonieta Aliaga Guevara

Mateus Gamba Torres

Siti Mistima Maat

Nikoleta Zampaki

Silvina Sosa

Víctor Ancajima Miñán

.....

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones
CICSHAL-RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the
CICSHAL-RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at

<https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



El presente libro tiene el aval del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina - CICSHAL.



Título: Bajo la sombra del petróleo. Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la Amazonía peruana

Derechos de autor | Copyright: Wilmer Arevalo Nima, Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocsas, Jonathan Wilson Sancarranco Estela, Gohan Augusto Chiroque Gómez, Miguel Humberto Apon Trelles

Primera Edición | First Edition: 2026

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 628.5 - Tecnología del control de la contaminación

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: RNP - Contaminación y amenazas al medioambiente | TQK - Control de la contaminación | RNU - Sostenibilidad

BISAC: TEC010000

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Ingeniería

Soporte | Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2026-10-21

ISBN: 978-9907-845-33-4

[APA 7]

Arevalo Nima, W., Tantaruna Ocsas, J. C. I., Sancarranco Estela, J. W., Chiroque Gómez, G. A., & Apon Trelles, M. H. (2026). *Bajo la sombra del petróleo. Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la Amazonía peruana*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.509>

Revisión por pares

El presente libro constituye el resultado de un riguroso proceso de investigación académica, cuya calidad metodológica y solidez argumental han sido validadas mediante un sistema de revisión por pares externos implementado bajo el protocolo de doble ciego, bajo la supervisión del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina (CICSHAL). Como garantía de transparencia y rigor científico, los informes de evaluación realizados por los especialistas designados se conservan en el archivo institucional de la editorial, a disposición de las instancias que así lo requieran.

Peer Review

This book is the result of a rigorous academic research process, whose methodological quality and argumentative solidity have been validated through an external peer-review system implemented under a double-blind protocol, under the supervision of the Center for Research in Sciences and Humanities from Latin America (CICSHAL). As a guarantee of transparency and scientific rigor, the evaluation reports prepared by the designated specialists are preserved in the publisher's institutional archives, available to any party that may require them.

Sobre los autores

ABOUT THE AUTHORS

Wilmer Arevalo Nima

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0003-0917-6304>

warevalon@unp.edu.pe

Ingeniero de Petróleo (UNI), con más de 40 años de experiencia en el sector hidrocarburos y gestión ambiental, laboro en PETROPERÚ, Pérez Companc, OSINERGMIN, etc. Docente Principal y actual Decano de la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNP.

Juan Carlos Ignacio Tantaruna Ocsas

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0001-9830-8238>

jtantarunao@unp.edu.pe

Profesor Principal a Tiempo Completo de la Universidad Nacional de Piura y actual Director de la Escuela Profesional de Ingeniería de Petróleo. Cuenta con amplia experiencia en hidrocarburos en OEFA, Dirección Regional de Energía y Minas, ECOTEST, Pluspetrol y PETROPERÚ.

Jonathan Wilson Sancarranco Estela

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-4130-4583>

jsancarrancoe@unp.edu.pe

j.sancarrancoe@gmail.com

Investigador doctoral especializado en hidrocarburos, ciencia ambiental y desarrollo de soluciones sostenibles. Experto en geomembranas, caracterización y tratamiento de hidrocarburos.

Gohan Augusto Chiroque Gómez

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

<https://orcid.org/0009-0002-1689-294X>

gohango1099@gmail.com

Ingeniero de Petróleo (UNP), con experiencia en el sector hidrocarburos, especialmente en el área de producción y análisis de operaciones petroleras. Especializado en Data Analytics con experiencia en docencia integrando conocimientos de ingeniería y herramientas tecnológicas.

Miguel Humberto Apon Trelles

Universidad Nacional de Piura | Piura | Perú

Universidad Tecnológica del Perú | Piura | Perú

Universidad Cesar Vallejo | Piura | Perú

<https://orcid.org/0000-0003-2821-998X>

C30879@utp.edu.pe

mapont@ucvvirtual.edu.pe

Migue280695@gmail.com

Ingeniero Pesquero colegiado, egresado de la Universidad Nacional de Piura en el año 2017, con grado de maestría en Docencia Universitaria en el año 2021 Universidad Cesar Vallejo, con grado de maestro en Ingeniería ambiental y seguridad Industrial 2022, en la Universidad Nacional de Piura, también, maestría culminada en Administración de Negocios Internacionales Universidad Nacional de Piura. Docente catedrático en Universidades privadas y nacionales.

Resumen

Esta obra examina la contaminación por hidrocarburos en el Lote 192, ubicado en la Amazonía peruana, y propone estrategias de remediación para recuperar los suelos afectados. A partir de una evaluación ambiental basada en informes oficiales, se identifican las cuencas más impactadas y los contaminantes predominantes, incluyendo hidrocarburos de fracción media y pesada, así como metales pesados. Se comparan diversas técnicas de biorremediación aplicadas en condiciones similares a las de la selva amazónica, destacando la eficiencia de los lodos activados para degradar las fracciones más persistentes y la atenuación natural con compost para las fracciones ligeras. La obra concluye con orientaciones para la implementación de estrategias de remediación y monitoreo, subrayando la importancia de considerar las condiciones territoriales, las capacidades institucionales y la participación comunitaria para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones a largo plazo.

Palabras clave:

contaminación por hidrocarburos; biorremediación; Lote 192; Amazonía peruana; remediación de suelos.

Abstract

This work examines hydrocarbon contamination in Lot 192, located in the Peruvian Amazon, and proposes remediation strategies to recover the affected soils. Based on an environmental assessment grounded in official reports, the most impacted river basins and predominant contaminants are identified, including medium and heavy hydrocarbon fractions, as well as heavy metals. Various bioremediation techniques applied under conditions similar to those of the Amazon rainforest are compared, highlighting the efficiency of activated sludge for degrading the most persistent fractions and natural attenuation with compost for lighter fractions. The work concludes with guidelines for implementing remediation and monitoring strategies, emphasizing the importance of considering territorial conditions, institutional capacities, and community participation to ensure the long-term sustainability of interventions.

Keywords:

hydrocarbon contamination; bioremediation; Lot 192; Peruvian Amazon; soil remediation.

Resumo

Esta obra examina a contaminação por hidrocarbonetos no Lote 192, localizado na Amazônia peruana, e propõe estratégias de remediação para recuperar os solos afetados. A partir de uma avaliação ambiental baseada em relatórios oficiais, identificam-se as bacias hidrográficas mais impactadas e os contaminantes predominantes, incluindo frações de hidrocarbonetos médias e pesadas, bem como metais pesados. Compararam-se diversas técnicas de biorremediação aplicadas em condições semelhantes às da floresta amazônica, destacando-se a eficiência dos lodos ativados para degradar as frações mais persistentes e a atenuação natural com composto para as frações leves. A obra conclui com orientações para a implementação de estratégias de remediação e monitoramento, sublinhando a importância de considerar as condições territoriais, as capacidades institucionais e a participação comunitária para garantir a sustentabilidade das intervenções a longo prazo.

Palavras-chave:

contaminação por hidrocarbonetos; biorremediação; Lote 192; Amazônia peruana; remediação de solos.

BAJO LA SOMBRA DEL PETRÓLEO

Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la Amazonía peruana

Contenido

Revisión por pares	7
Peer Review	7
Sobre los autores	8
About the authors	8
Resumen	10
Abstract	11
Resumo	11
Introducción	16

Capítulo 1 22

Aspectos problemáticos de la contaminación por hidrocarburos en el Lote 192	22
La configuración histórica de un pasivo ambiental persistente	23
Los impactos diferenciados sobre el suelo y los ecosistemas amazónicos	26
La dimensión social de la contaminación y los desafíos de la remediación	29

Capítulo 2 34

Fundamentos teóricos para la comprensión de la contaminación por hidrocarburos y las estrategias de remediación en ecosistemas amazónicos	34
Caracterización y realidad de los sitios contaminados por hidrocarburos en el Perú y Ecuador	35
Bases conceptuales y fundamentos técnicos de la remediación ambiental	40
Lote 192	40
Descripción de las instalaciones del lote 192	43
Evaluación ambiental	46
Tipos de evaluación ambiental	49
Contaminación de suelos	50
Desechos generados por las actividades petrolíferas	51
Desechos sólidos industriales peligrosos	53

Desechos líquidos industriales peligrosos	53
Desechos sólidos industriales no-peligrosos	54
Efluentes líquidos/descargas operacionales	54
Desechos domésticos	55
Desechos hospitalarios	55
Desechos químicos	56
Estabilización / Solidificación	59
Encapsulamiento de los residuos generados durante las actividades de perforación	61
Biotratamiento o biorremediación	62
Biotratamiento In Situ	66
Biotratamiento Ex Situ	70
Métodos de remediación aplicados a la Amazonía peruana	86
Glosario de términos básicos	90
Marco referencial	93
Proposiciones orientadoras de la investigación	94

Capítulo 3 98

Enfoque metodológico para la evaluación ambiental y la selección de técnicas de remediación	98
Fundamentación del enfoque cuantitativo y del diseño descriptivo no experimental	99
Procedimientos de recolección y análisis de información ambiental	101
Criterios para la selección de la técnica de remediación más adecuada	103

Capítulo 4 107

Análisis de los resultados y discusión de los hallazgos ambientales en el Lote 192	107
Contaminación de suelo en la cuenca del Río Pastaza	108
Contaminación de suelo del Río Corrientes	117
Contaminación del suelo del Río Tigre	123
Eficiencia de Métodos de Biorremediación	131
Biorremediación con Lodos Activados	139
Tres cuencas, una misma herida: la persistencia de la contaminación por hidrocarburos y metales pesados en el Lote 192	143
El papel de los lodos activados en la recuperación del Lote 192	145
La biorremediación con lodos activados y los desafíos del Lote 192	145

Capítulo 5	148
La dimensión territorial de la remediación ambiental en el Lote 192	148
Las condiciones territoriales de la remediación en la Amazonía peruana	149
Las capacidades institucionales y comunitarias para la sostenibilidad de las intervenciones	152
Un marco de priorización territorial para la asignación de recursos	156
Consideraciones finales sobre la gestión territorial de la remediación	160
Capítulo 6	165
Síntesis de hallazgos y orientaciones para la recuperación ambiental del Lote 192	165
La persistencia de la contaminación y sus implicaciones para la gestión ambiental	166
La selección de técnicas de remediación y su fundamentación empírica	169
Orientaciones para la implementación de estrategias de remediación y monitoreo	172
Referencias	176

TABLAS

Tabla 1. Sectores del lote 192	26
Tabla 2. Concentración de contaminantes en el suelo del Río Pastaza	108
Tabla 3. Concentración de contaminantes en el suelo del Río Corrientes	117
Tabla 4. Concentración de contaminantes en el suelo del Río Tigre	123
Tabla 5. Porcentaje de Eficiencia en la Biorremediación en Suelos esterilizados y no esterilizados.	131
Tabla 6. Eficiencia de Remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP)	135
Tabla 7. Parámetros Fisicoquímicos y Mecánicos del Suelo Antes y Después del Tratamiento	135
Tabla 8. Remoción de TPH F2 y F3 vs. Crecimiento microbiano.	140
Tabla 9. Promedio de porcentaje de degradación, según días de evaluación respecto a inóculos utilizados.	142

Introducción

La actividad de exploración y explotación de hidrocarburos ha sido, desde sus inicios, una de las actividades industriales de mayor impacto transformador sobre el territorio y las sociedades que lo habitan. En la Amazonía peruana, esta actividad se remonta a décadas atrás y ha dejado una huella profunda no solo en la economía nacional, sino también en la configuración ambiental y social de una de las regiones de mayor biodiversidad del planeta. El Lote 192, ubicado en la región de Loreto y anteriormente conocido como Lote 1AB, constituye el caso más emblemático de esta tensión entre desarrollo extractivo y conservación ambiental. Con más de dos mil sitios contaminados identificados desde 1975, esta área representa uno de los pasivos ambientales más complejos y persistentes de la industria petrolera sudamericana, donde la infraestructura envejecida, la insuficiente fiscalización y las limitaciones técnicas de las estrategias de remediación han convergido para producir un deterioro ambiental de largo plazo cuyas consecuencias aún no han sido plenamente dimensionadas.

La contaminación por hidrocarburos en esta región no constituye un fenómeno simple ni homogéneo. Los derrames de petróleo crudo, las aguas de producción con elevadas concentraciones de sales y metales, los lodos de perforación con aditivos químicos y los residuos asociados a las operaciones de mantenimiento han generado una compleja mezcla de contaminantes que se distribuyen de manera desigual en el territorio. La fracción de hidrocarburos totales de petróleo, los metales pesados como el bario, cadmio, plomo, cromo y mercurio, y los compuestos orgánicos volátiles como el benceno, tolueno y etilbenceno constituyen los principales indicadores de esta contaminación, cuya persistencia en el suelo y los sedimentos representa un riesgo latente para los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como para la salud de las comunidades indígenas que dependen de estos recursos para su subsistencia. La literatura científica ha documentado que la exposición prolongada a estos contaminantes puede generar efectos crónicos sobre la biota y los seres humanos, incluyendo alteraciones en la función reproductiva, daño hepático y renal, y efectos carcinogénicos.

La evaluación ambiental de sitios contaminados por hidrocarburos constituye un proceso técnico complejo que requiere la integración de múltiples disciplinas, desde la química analítica hasta la hidrogeología, pasando por la ecología y la ingeniería ambiental. En el contexto peruano, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

ha desarrollado protocolos específicos para la caracterización de sitios impactados, estableciendo parámetros de muestreo, análisis y comparación con los Estándares de Calidad Ambiental que definen los niveles máximos permisibles de contaminantes en el suelo según su uso previsto. Estos estándares, diferenciados para suelos de uso agrícola, residencial, comercial e industrial, proporcionan el marco de referencia para determinar la severidad de la contaminación y priorizar las intervenciones de remediación. Sin embargo, la aplicación de estos criterios en la Amazonía peruana enfrenta desafíos particulares derivados de la alta pluviosidad, la fragilidad de los ecosistemas tropicales y la presencia de comunidades indígenas cuyos territorios han sido históricamente afectados por la actividad petrolera.

La remediación de suelos contaminados por hidrocarburos ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, transitando desde enfoques puramente físicos y químicos hacia estrategias biológicas que aprovechan la capacidad metabólica de microorganismos y plantas para degradar o transformar los contaminantes. La biorremediación, en sus diversas modalidades, se ha consolidado como una alternativa viable y sostenible para la recuperación de suelos contaminados, especialmente en contextos donde los métodos convencionales resultan económicamente inviables o ambientalmente invasivos. Técnicas como el landfarming, el compostaje, las biopilas,

la fitorremediación y el uso de lodos activados han demostrado diferentes grados de eficacia en la remoción de hidrocarburos, dependiendo de factores como el tipo de contaminante, las características del suelo, las condiciones climáticas y el tiempo de tratamiento disponible. La selección de la técnica más adecuada para un sitio específico requiere una comprensión profunda de estos factores y de las interacciones entre ellos.

La presente obra se sumerge en esta problemática para explorar las condiciones ambientales del Lote 192 y evaluar las alternativas de remediación más apropiadas para restaurar la calidad de sus suelos. El objetivo general que orienta esta investigación consiste en proponer procesos de remediación efectivos, basados en una evaluación exhaustiva del daño ocasionado al área del Lote 192, con el fin de reducir significativamente la contaminación y restaurar la calidad del suelo y los ecosistemas afectados. Para alcanzar este propósito, se han formulado los siguientes objetivos específicos: primero, realizar un análisis exhaustivo del daño ambiental en el área del Lote 192, evaluando los diferentes tipos de contaminantes presentes en el suelo; segundo, identificar y mapear las áreas contaminadas del Lote 192, determinando la extensión y severidad de la contaminación para priorizar las acciones de remediación; y tercero, evaluar la eficiencia de diferentes técnicas de biorremediación aplicadas en condiciones similares a las de la selva amazónica peruana, con el fin de

seleccionar la alternativa más adecuada para las condiciones específicas del área de estudio.

Capítulo 1

*Aspectos problemáticos de la contaminación por
hidrocarburos en el Lote 192*

BAJO LA SOMBRA DEL PETRÓLEO

Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la
Amazonía peruana

La configuración histórica de un pasivo ambiental persistente

La contaminación por hidrocarburos en la Amazonía peruana constituye un fenómeno de larga data cuyas raíces se remontan a las primeras décadas de la actividad petrolera en la región. El Lote 192, anteriormente conocido como Lote 1AB, ha sido escenario de operaciones de exploración y explotación desde mediados del siglo pasado, cuando la legislación ambiental era prácticamente inexistente y las prácticas operativas carecían de los estándares de protección que hoy se consideran indispensables. La infraestructura construida durante esas décadas iniciales, incluyendo oleoductos, baterías de producción, pozos y facilidades de superficie, ha envejecido sin recibir el mantenimiento adecuado, convirtiéndose en una fuente permanente de derrames y fugas que han contaminado el suelo, los sedimentos y los cuerpos de agua de la región. La publicación “La sombra de los hidrocarburos en Perú” de Oxfam y el Subgrupo de derrames petroleros de la Coordinadora Nacional de Derechos Humanos documenta que, desde 1997 hasta mayo de 2021, se han registrado 566 derrames en las regiones amazónicas, siendo Pluspetrol Norte y Frontera Energy las empresas con mayor número de incidentes, con 306 y 114 derrames respectivamente, seguidas por Petroperú con 111 incidentes.

La magnitud del problema trasciende la mera acumulación de incidentes individuales para configurar un pasivo ambiental de dimensiones extraordinarias. Desde 1975, se han identificado más de 2159 sitios contaminados debido a la actividad petrolera en el área del Lote 192, una cifra que evidencia la extensión sistémica del deterioro ambiental y la insuficiencia de las estrategias de remediación implementadas hasta la fecha. La persistencia de estos sitios contaminados a lo largo de décadas refleja no solo la gravedad de los derrames originales, sino también la incapacidad de las empresas operadoras y de las autoridades fiscalizadoras para abordar de manera efectiva la recuperación de los ecosistemas afectados. La literatura académica ha señalado que la contaminación por hidrocarburos en la Amazonía peruana constituye un problema generalizado que afecta a múltiples cuencas hidrográficas y que requiere intervenciones coordinadas y sostenidas en el tiempo para lograr resultados significativos.

Las causas de esta problemática son múltiples y se refuerzan mutuamente. La infraestructura en mal estado constituye uno de los factores más críticos, con ductos corroídos, válvulas defectuosas y equipos obsoletos que aumentan la probabilidad de fallas operativas y derrames. La insuficiente fiscalización ambiental, manifestada en la escasa supervisión y sanción de las empresas operadoras, ha permitido que las prácticas negligentes se perpetúen sin consecuencias significativas. La escasa implementación de

tecnologías avanzadas para la biorremediación, derivada de la falta de inversión en métodos modernos y efectivos, ha impedido la recuperación adecuada de los ecosistemas afectados, prolongando la exposición de la flora y fauna a contaminantes tóxicos y poniendo en riesgo la salud de las poblaciones indígenas que dependen de estos recursos naturales. La combinación de estos factores ha creado un círculo vicioso en el que la contaminación se acumula más rápido de lo que puede ser remediada, generando un deterioro progresivo cuyas consecuencias son cada vez más difíciles de revertir.

La delimitación geográfica del área de estudio comprende el Lote 192, ubicado en la región noroeste de la Amazonía peruana, cerca de la frontera con Ecuador. Esta región abarca los distritos de Andoas, Trompetero y Tigre, que pertenecen a las provincias de Datem del Marañón y Loreto, con una extensión aproximada de 512,347 hectáreas.

Figura 1. Lote 192



Nota: OEFA (2022).

Tabla 1. Sectores del lote 192

SECTOR	DESCRIPCIÓN
A	Capahuari Norte - Capahuari Sur
B	Andoas - Capahuari Sur
C	Tambo - Capahuari Sur
D	Capahuari Sur - Huayuri
E	Huayuri - Jibarito
F	Dorissa - T Dorissa
G	Huayuri - Shiviycu
H	Carmen - Shiviycu
I	Forestal - Shiviycu
J	Shiviycu - San Jacinto

Nota: OEFA (2022).

Los impactos diferenciados sobre el suelo y los ecosistemas amazónicos

La contaminación por hidrocarburos ejerce efectos adversos de diversa naturaleza sobre los suelos amazónicos, alterando sus propiedades físicas, químicas y biológicas de manera que comprometen su capacidad para sustentar la vida vegetal, animal y microbiana. La introducción de hidrocarburos en el suelo genera cambios en su estructura, reduciendo la porosidad y la capacidad de infiltración del agua, lo que a su vez afecta los procesos de aireación y drenaje que son esenciales para la actividad biológica. La pérdida de materia orgánica y de nutrientes minerales como potasio, sodio, sulfato, fosfato y nitrato constituye otra consecuencia significativa de la contaminación, ya que estos elementos son indispensables para el

crecimiento de las plantas y para el mantenimiento de la fertilidad del suelo. La presencia de contaminantes también expone al suelo a procesos de lixiviación y erosión, que pueden transportar los contaminantes hacia las aguas subterráneas y superficiales, ampliando el alcance de la contaminación más allá del sitio original.

La contaminación del suelo no solo disminuye su fertilidad, sino que también aumenta los riesgos para la salud humana y el medio ambiente al infiltrarse en las fuentes de agua subterránea, afectando directamente la calidad del agua potable y, por ende, la salud de las comunidades cercanas. La literatura científica ha documentado que los contaminantes presentes en los suelos contaminados por hidrocarburos pueden incluir metales pesados como bario, cadmio, mercurio y plomo, así como compuestos orgánicos persistentes que tienen efectos tóxicos sobre los organismos vivos. Estos contaminantes pueden acumularse en los tejidos de las plantas y los animales, entrando en la cadena alimentaria y exponiendo a las poblaciones humanas a riesgos de salud que van desde intoxicaciones agudas hasta efectos crónicos como alteraciones endocrinas y cáncer. La concentración a la que se encuentran los metales en los residuos de perforación puede ocasionar toxicidad crónica por exposición prolongada, y los efectos crónicos de los metales sobre la biota y los humanos están bien documentados en la literatura científica.

La contaminación de suelos en áreas de alta biodiversidad como la Amazonía tiene un impacto particularmente significativo en los servicios ecosistémicos, comprometiendo la capacidad de los suelos para mitigar el cambio climático, regular el ciclo del agua y sustentar la vida. Los suelos amazónicos, aunque generalmente pobres en nutrientes, cumplen funciones ecológicas críticas que dependen de su integridad física y biológica. La contaminación por hidrocarburos altera estas funciones, reduciendo la capacidad del ecosistema para reciclar nutrientes, mantener la humedad del suelo y proporcionar hábitat para la diversidad de organismos que habitan en él. La pérdida de estas funciones tiene consecuencias en cascada que afectan a todos los componentes del ecosistema, desde los microorganismos del suelo hasta los grandes mamíferos que dependen de la vegetación para su alimentación. La investigación ha demostrado que la presencia de hidrocarburos en el suelo puede persistir durante décadas, especialmente en las fracciones más pesadas, lo que significa que los efectos de la contaminación se prolongan mucho más allá del momento en que se produce el derrame.

Las aguas de producción, separadas del petróleo crudo en las baterías, contienen elevadas concentraciones de sal capaces de causar efectos letales a la biota acuática cerca de los puntos de descarga, tal como ocurrió en el ex Lote 1AB antes de 2009. Estas aguas también contienen metales pesados en concentraciones traza e hidrocarburos de

petróleo, disueltos y en emulsión, que pueden contribuir con la exposición de ambos contaminantes en el ambiente. Los metales pesados que se encuentran como cationes pueden ser intercambiados por los cationes cambiabiles de las arcillas de los suelos y sedimentos, convirtiéndose en una fuente secundaria de metales en el ambiente. Esta dinámica de intercambio iónico significa que la contaminación por metales pesados puede persistir y redistribuirse en el ambiente mucho después de que cesan las descargas originales, complicando los esfuerzos de remediación y prolongando la exposición de los ecosistemas a sustancias tóxicas.

La dimensión social de la contaminación y los desafíos de la remediación

La contaminación por hidrocarburos en el Lote 192 no es únicamente un problema ambiental; constituye también una profunda problemática social que afecta los derechos fundamentales de las comunidades indígenas que habitan en la región. Estas comunidades, que dependen de los recursos naturales para su subsistencia y para la reproducción de sus prácticas culturales, han visto comprometida su capacidad para pescar, cazar, recolectar y cultivar en territorios que han sido contaminados por derrames de petróleo. La pérdida de estas actividades tradicionales no solo afecta la seguridad alimentaria de

las comunidades, sino que también erosiona su identidad cultural y su vínculo con el territorio, generando procesos de desplazamiento y desestructuración social que tienen consecuencias de largo plazo. La Amazonía peruana ha sufrido un largo historial de derrames con trágicas consecuencias para el medio ambiente, y las reclamaciones por contaminación y destrucción del entorno natural de los pueblos originarios son innumerables y reflejan el grave impacto que ocasionan estas actividades en sus territorios.

La dimensión social de la contaminación se manifiesta también en la desigualdad en la distribución de los impactos y en el acceso a los beneficios de la actividad petrolera. Mientras que las comunidades locales soportan las consecuencias negativas de la contaminación, los beneficios económicos de la explotación petrolera se concentran en otros niveles de la economía y en otros actores sociales. Esta asimetría ha generado conflictos sociales y demandas de justicia ambiental que han sido documentadas por organizaciones de derechos humanos y que constituyen un elemento central del contexto en el que se desarrolla la presente investigación. La literatura sobre justicia ambiental ha señalado que las comunidades indígenas de la Amazonía peruana han sido históricamente excluidas de los procesos de toma de decisiones sobre la actividad petrolera que afecta sus territorios, lo que ha profundizado

su vulnerabilidad y limitado su capacidad para exigir la reparación de los daños sufridos. La falta de mecanismos efectivos de participación y consulta ha contribuido a que las decisiones sobre la gestión ambiental del lote se tomen sin considerar adecuadamente las necesidades y perspectivas de las comunidades afectadas.

Los desafíos de la remediación en este contexto son múltiples y complejos. La selección de la técnica más adecuada requiere considerar no solo la eficiencia en la remoción de contaminantes, sino también la viabilidad económica, la disponibilidad de recursos técnicos y humanos, y la aceptabilidad social de las intervenciones propuestas. Las técnicas de biorremediación, que aprovechan la capacidad de microorganismos y plantas para degradar los contaminantes, ofrecen ventajas significativas en términos de sostenibilidad y bajo costo, pero requieren tiempos de tratamiento prolongados y condiciones ambientales controladas que pueden ser difíciles de mantener en el contexto amazónico. Las técnicas fisicoquímicas, por su parte, ofrecen resultados más rápidos pero implican costos más elevados y pueden generar impactos secundarios sobre el suelo y los ecosistemas. La investigación sobre la eficiencia de diferentes técnicas de biorremediación en condiciones similares a las de la selva amazónica peruana constituye, por lo tanto, una contribución significativa para la selección informada de las estrategias de remediación más apropiadas.

La presente investigación aborda estos desafíos mediante la evaluación ambiental del Lote 192 y la comparación de diferentes técnicas de biorremediación aplicadas en condiciones controladas. Los resultados de esta evaluación permitirán identificar las zonas más afectadas por la contaminación, determinar el tipo y la concentración de los contaminantes presentes, y seleccionar la técnica de remediación que ofrezca la mejor combinación de eficiencia, viabilidad y sostenibilidad para las condiciones específicas del área de estudio. La contribución de esta investigación trasciende el caso particular del Lote 192 para proporcionar un marco metodológico y un conjunto de hallazgos que pueden ser aplicados en otras áreas afectadas por la contaminación por hidrocarburos en la Amazonía sudamericana. La remediación efectiva de estos pasivos ambientales no solo es una obligación legal y ética, sino también una condición necesaria para garantizar la sostenibilidad de las operaciones petroleras y la protección de los derechos de las comunidades que habitan en las zonas de influencia de la actividad extractiva.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos para la comprensión de la contaminación por hidrocarburos y las estrategias de remediación en ecosistemas amazónicos

BAJO LA SOMBRA DEL PETRÓLEO

Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la
Amazonía peruana

Caracterización y realidad de los sitios contaminados por hidrocarburos en el Perú y Ecuador

El estudio de los pasivos ambientales asociados a la industria petrolera exige, antes que nada, una mirada rigurosa sobre los procedimientos que se emplean para caracterizar los suelos y las aguas subterráneas afectadas. En ese sentido, Rangel Vega (2020), con su tema sobre la caracterización de sitios contaminados por hidrocarburos en el Perú, se propuso analizar los procedimientos empleados en la caracterización de dichos sitios dentro del sector hidrocarburos. La muestra de su investigación estuvo constituida por el suelo y las aguas subterráneas contaminadas, asociadas en su mayoría a los pasivos ambientales del noroeste, con casi 150 años de actividad, y de la selva norte, con casi 50 años de exploración y explotación.

El diseño que utilizó fue descriptivo, analítico y propositivo, descriptivo, porque pretendía describir los diferentes escenarios o regiones donde se ubican los sitios contaminados del sector hidrocarburos en el Perú e identificar los niveles de riesgo enmarcados en la cantidad de receptores ambientales y su susceptibilidad; analítico, porque analiza y otorga un orden de prioridad a la caracterización con procedimientos alineados a estándares internacionales; y propositivo, ya que propone una metodología de priorización para determinar las áreas que requieren caracterizar

los suelos contaminados identificados como PASH. Los instrumentos utilizados fueron la recopilación de información digital y física de informes, libros y publicaciones de instituciones públicas como el Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio del Ambiente, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), PERUPETRO, PETROPERU y el Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana (IIAP); asimismo, se recabó información de tesis y artículos científicos referidos a las actividades de hidrocarburos y medio ambiente. También se realizó un tratamiento diferente, como sucedió con la verificación de la ubicación de sitios afectados por las actividades de hidrocarburos en la selva, para lo cual se utilizó el software ArcGIS para su georreferenciación.

Los resultados obtenidos revelaron que las fuentes más importantes de contaminación en los sitios petroleros y sus contaminantes más comunes son: los lodos de perforación (bario, sulfato); el petróleo crudo (hidrocarburos de petróleo, metales); el agua producida (sales, metales, hidrocarburos de petróleo y materiales radioactivos); y los productos químicos utilizados en las operaciones de mantenimiento (ácido clorhídrico, biosidas).

Por su parte, Angeles Mendiola (2018), en su tesis titulada “Situación actual de la contaminación por actividades de hidrocarburos en la selva peruana”, brinda información sobre la situación actual de la contaminación por

hidrocarburos en la selva peruana, comenzando con la identificación de los lotes trazados en la Amazonía y su superposición con las Áreas Naturales Protegidas (ANP). Se enfoca en casos como los del lote 1-AB y el Oleoducto Norperuano (ONP), registrando casos desde 1975, cuando no existía legislación ambiental y cuyas consecuencias a día de hoy son casi imposibles de remediar. Allí, la empresa Pluspetrol Norte S.A. viene incumpliendo sus obligaciones sin ninguna sanción efectiva, a pesar de que federaciones y organizaciones indígenas lideran los reclamos al Estado para la remediación y recuperación de sitios afectados en el lote 192. Para el caso del Oleoducto Norperuano, se muestran los derrames ocurridos en los años 2016 y 2017 a cargo de PETROPERÚ S.A., en el cual se determinó que las malas prácticas en sus relaciones comunitarias, la poca supervisión en el cuidado del ducto, así como una inexistente presencia del Estado, fueron los posibles factores para la ocurrencia de los actos vandálicos por parte de la población, que han llevado a la ruptura del ONP hasta en 10 oportunidades en el departamento de Loreto en los años mencionados, ocasionando un grave daño ambiental que no ha sido hasta ahora remediado por completo (Angeles Mendiola, 2018).

En la misma línea, Patrón Herrera (2018), en su estudio titulado “Evaluación de la gestión ambiental en actividades de explotación de hidrocarburos, caso lote 192”, desarrolla una evaluación de la gestión ambiental en las ac-

tividades de exploración y explotación de hidrocarburos en el país, tomando como ejemplo el caso del lote 192, ubicado en la región Loreto, en la Amazonía peruana. Para ello realiza un análisis de los instrumentos de gestión ambiental aplicables a las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos y, puntualmente, los del lote 192, así como un análisis de las normas ambientales y del subsector hidrocarburos. Además, describe las principales actividades de exploración y explotación de hidrocarburos, los contratos de hidrocarburos y la situación ambiental en el lote 192, los impactos ambientales generados y el estado de mitigación de estos, a la luz de los instrumentos de gestión ambiental aplicables. Con ello, se identificaron oportunidades de mejora para la gestión ambiental de las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos, y específicamente en el lote 192, caso particularmente complejo por su historia de más de 40 años de explotación de hidrocarburos, su ubicación, los grupos de interés involucrados y su importancia para el país (Patrón Herrera, 2018).

A esta dimensión ambiental se suma la perspectiva tributaria y de derechos humanos que aborda Trinidad Alvarado (2021) en su tesis titulada “Pueblos indígenas, ambiente y tributación: un análisis crítico de los gastos de resarcimiento de daños ambientales a la luz de los estándares de la Convención Americana de Derechos Humanos”. En esta investigación se analizó una de las dimensiones de

los derrames de petróleo en la Amazonía peruana: la tributación, enfocándose en evaluar y revisar críticamente las decisiones de los órganos de la administración tributaria sobre la deducción de diversos gastos de mitigación y resarcimiento de derrames de petróleo en los Lotes 8 y 192 en la determinación del Impuesto a la Renta. La hipótesis de esta investigación partió de la siguiente premisa: la deductibilidad de este tipo de gastos en el Impuesto a la Renta contraviene las obligaciones provenientes del Sistema Interamericano de Derechos Humanos sobre los derechos de los pueblos indígenas (Trinidad Alvarado, 2021).

Finalmente, la mirada se extiende al contexto ecuatoriano con el estudio de Tomalá (2018), titulado “Estudio técnico para la implementación de un sistema de tratamiento de suelos contaminados de hidrocarburos que minimizará el impacto ambiental de la empresa Asociación SMC. Pacifpetrol.INC.”, ubicada en la parroquia Ancón, Provincia de Santa Elena, en la ciudad de La Libertad, Ecuador. El objetivo general de este estudio fue implementar un novedoso método de remediación de suelo llamado Landfarming tipo plataforma para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. La muestra estuvo constituida por el personal administrativo y operativo de la empresa Pacifpetrol y por la contaminación de los suelos con hidrocarburos. El diseño que se utilizó fue experimental, porque este proyecto de elaboración de un método de biorremediación por plataforma tiene un cos-

to de \$22.275,00, el cual será financiado por la empresa Asociación Pacifpetrol. Los instrumentos que se utilizaron fueron una encuesta al personal de medio ambiente, a quienes se les hicieron preguntas enfocadas a los métodos de remediación de suelos que se utilizan actualmente y a la implementación del sistema de tratamiento de suelo Landfarming tipo plataforma. Los resultados obtenidos han sido que, mediante la construcción de este sistema, la empresa no solo obtiene beneficio económico debido a los materiales que se utilizarán en la elaboración de este proyecto —ya que son resistentes a los factores a los que se exponen—, sino que contribuirá a remediar el suelo contaminado en los campos petroleros..

Bases conceptuales y fundamentos técnicos de la remediación ambiental

Lote 192

El lote 192 es el lote petrolero más grande y productivo del Perú, ubicado en la región Loreto, entre las provincias del Datem del Marañón y Loreto. Tiene una extensión de más de 500 mil hectáreas y unas reservas estimadas en 127 millones de barriles de petróleo. Su producción actual es de unos 12 mil barriles por día, que se destinan a la Nueva Refinería Talara.

El lote 192 ha sido objeto de varios conflictos sociales y ambientales, debido a los derrames de petróleo que han afectado a las comunidades nativas de la zona, así como a la biodiversidad de la selva amazónica. Según un reportaje de El País, hay 2.000 sitios devastados por la actividad petrolera en el lote, con una cantidad de tierra contaminada suficiente para llenar 231 estadios nacionales

El lote 192 también ha tenido varios cambios de operador a lo largo de su historia. Desde el año 2020, el lote se encuentra paralizado, luego de que la empresa canadiense Frontera Energy terminara su contrato y no se renovara por falta de acuerdo con el Estado peruano. Anteriormente, el lote había sido operado por empresas como Pluspetrol Occidental y Mobil.

El 28 de febrero de 2023, Petroperú y Perupetro suscribieron el contrato de licencia para la explotación del lote 192 por 30 años, con lo que Petroperú asumió la operación directa del yacimiento por primera vez. El contrato también establece un fondo social para el desarrollo de las comunidades nativas, equivalente al 1.5% de la valorización del crudo producido.

Petroperú ha iniciado el proceso de reactivación del lote 192, con miras a retomar las actividades de producción en el primer trimestre de 2024. Para ello, ha convocado a un socio estratégico que le transfiera un porcentaje de participación en el lote y le brinde asistencia técnica y finan-

ciera. La empresa seleccionada para este fin es Altamesa Energy, una compañía estadounidense con experiencia en la explotación de hidrocarburos en América Latina.

El lote 192 representa una oportunidad para el desarrollo económico y social del Perú, siempre que se respeten los derechos de las poblaciones indígenas y se garantice la protección del medio ambiente. Asimismo, es un proyecto estratégico para Petroperú, que busca consolidarse como una empresa petrolera integrada y competitiva en el mercado nacional e internacional.

Figura 2. Lote 192



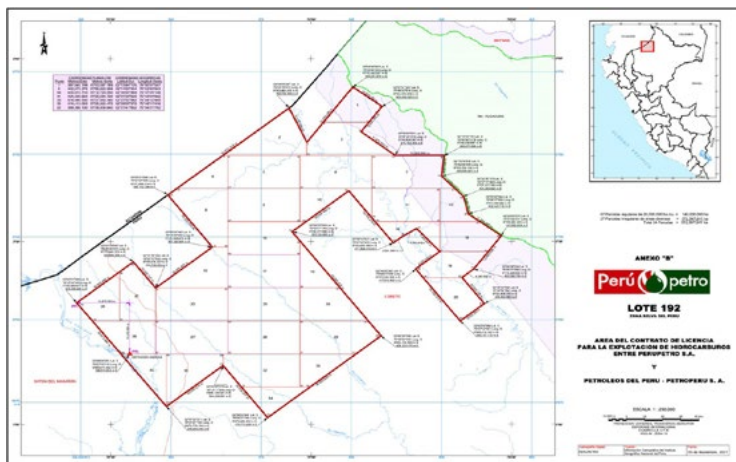
Nota: Petroperu

Descripción de las instalaciones del lote 192

YACIMIENTOS:

Los Yacimientos que abarcan el Lote 192 son: Capahuari Norte, Capahuari Sur, Dorissa, Forestal, Shiviya-cu, Huayuri, los cuales actualmente producen crudo del tipo liviano y se encuentran ubicados en la parte occidental del Lote, mientras que los Yacimientos de San Jacinto y Jibarito producen crudo del tipo pesado y se encuentran ubicados en la parte oriental del Lote.

Figura 3. Ubicación del lote 192



Nota: perupetro

Proceso productivo:

El proceso productivo/extractivo es similar en cada uno de los Yacimientos de producción del Lote 192. El flujo llega hasta el múltiple de producción donde se distribuye hacia los separadores de flujo, en el que se separan los gases de los líquidos TESIS 67 Diagnóstico de la Calidad de Suelo del Lote 192, Provincias de Loreto y Datem del Marañón, Departamento de Loreto (petróleo y agua). Usualmente la separación es por gravedad bifásica y si es necesario estas unidades pueden separar individualmente cada elemento (agua, petróleo y gas).

Figura 4. Reactivación del lote 192



Nota: petroperu

Figura 5. Reactivación del lote 192



Nota: petroperu

Baterías de producción:

Las baterías son instalaciones compuestas por tanques, bombas y tuberías donde se recolecta la producción de varios pozos para enviarla posteriormente a través de líneas de flujo a otros sitios según las operaciones que se realicen. Entre las funciones tenemos:—Recolectar la producción de los diferentes pozos de una determinada área.—Separar la fase líquida y gaseosa del líquido multifásico (emulsión) proveniente de los pozos productores.—Medir la producción de petróleo, agua y gas de cada pozo productor.—Proporcionar un sitio para el almacenamiento temporal de petróleo.—Bombear el petróleo al patio de tanques.

Figura 6. Reactivación del lote 192



Nota: infobae

Transporte de hidrocarburos:

Una vez almacenado el petróleo, en el patio de tanques de cada batería, se procede al transporte para la refinación y posterior venta. Pero los campos petroleros suelen encontrarse lejos de los lugares de refinación, por lo que el transporte se convierte en un aspecto fundamental de la industria petrolera. En el Lote 192, el transporte de hidrocarburos se realiza a través de ductos de acero en superficie, que en algunos tramos presenta soportes tipo H.

Evaluación ambiental

Es un proceso que busca identificar, prevenir y mitigar los posibles impactos negativos que un proyecto, plan o

programa pueda tener sobre el medio o ambiente, así como mejorar sus beneficios ambientales. (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, s.f.).

La evaluación ambiental es un conjunto de herramientas de gestión ambiental que permiten la valoración del ambiente para su comprensión y la toma de decisiones informadas con respecto a una iniciativa. A este fin se considera al ambiente como un sistema complejo y dinámico resultante de la interacción de los componentes bióticos, abióticos y social en una unidad espacio temporal (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, s.f.).

Por lo que la evaluación ambiental es un proceso que busca integrar los aspectos ambientales en la planificación y ejecución de proyectos, planes y programas que puedan tener efectos sobre el medio ambiente y cuyo objetivo es prevenir, mitigar o compensar los impactos negativos y potenciar los positivos, así como facilitar la participación pública y la coordinación interinstitucional. Existen diferentes tipos de evaluación ambiental según el nivel de detalle y el alcance del análisis. Algunos de los más comunes son:

Evaluación de impacto ambiental (EIA)

Es el estudio técnico que identifica, predice, evalúa y propone medidas para evitar, reducir o compensar los

impactos ambientales significativos que puede causar un proyecto concreto (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

La EIA se realiza antes de la ejecución del proyecto y debe ser aprobada por la autoridad ambiental competente.

Evaluación ambiental estratégica (EAE)

Es el análisis ambiental de planes y programas que establecen el marco para futuros proyectos o actividades. La EAE tiene una visión más amplia y estratégica que la EIA, y busca incorporar los principios de sostenibilidad en la planificación territorial, sectorial o institucional

Auditoría ambiental (AA)

Es la verificación periódica del cumplimiento de la normativa ambiental y de las medidas establecidas en la EIA o en la EAE por parte del promotor o del responsable del proyecto, plan o programa. La AA también sirve para detectar posibles desviaciones o mejoras en el desempeño ambiental

La evaluación ambiental es una herramienta fundamental para garantizar el equilibrio entre el desarrollo económico y social y la conservación del medio ambiente. Además,

contribuye a fortalecer la capacidad ambiental del país y a fomentar la participación ciudadana en las decisiones que afectan al entorno.

La Dirección de Evaluación Ambiental propone, planifica y ejecuta acciones que permitan identificar la existencia de impactos negativos al ambiente, así como su causa y el responsable, a través de distintos tipos de evaluación ambiental, de tal forma que se asegure el cumplimiento de la política y la normativa ambiental, a fin de preservar el cumplimiento de la política y la normativa ambiental, a fin de preservar una adecuada calidad ambiental. (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental–OEFA, 2020).

Según OEFA existen diferentes tipos de evaluación ambiental las cuales solo se nombrarán a continuación y se desarrollarán más adelante durante la ejecución de la investigación

Tipos de evaluación ambiental

- Evaluación ambiental temprana (EAT)
- Evaluación ambiental de causalidad (EAC)
- Evaluación ambiental de seguimiento (EAS)
- Evaluación ambiental focal (EAF)
- Evaluación ambiental por normativa especial

- » Identificación de pasivos ambientales del subsector hidrocarburos (IPASH)
- » Identificación de sitios impactados por hidrocarburos (ISIM)

Contaminación de suelos

La contaminación de suelos ocurre cuando el suelo experimenta cambios físicos, químicos y biológicos debido a la introducción de sustancias externas que, en altas concentraciones, afectan su capacidad para sustentar la vida vegetal, animal y microbiana. Según Ramírez-Villalobos (2018), la contaminación del suelo es principalmente resultado de actividades humanas como el uso intensivo de pesticidas y fertilizantes, la minería, la industrialización y los derrames de productos petroleros, lo que provoca la acumulación de compuestos tóxicos como metales pesados, hidrocarburos y compuestos orgánicos persistentes (COP). Estos contaminantes no solo modifican la estructura y función del suelo, sino que también impactan los ecosistemas circundantes, afectando la biodiversidad y los recursos hídricos.

Aguilar-García y Jiménez-Ojeda (2020), señalan que la contaminación del suelo no solo disminuye su fertilidad, sino que también aumenta los riesgos para la salud humana y el medio ambiente al infiltrarse en las fuentes de agua subterránea, afectando directamente la calidad del

agua potable y, por ende, la salud de las comunidades cercanas. La contaminación de suelos, especialmente en áreas de alta biodiversidad como la Amazonía, tiene un impacto significativo en los servicios ecosistémicos, comprometiendo la capacidad de los suelos para mitigar el cambio climático, regular el ciclo del agua y sustentar la vida.

Estamos de acuerdo con Ramírez-Villalobos (2018) y Aguilar-García y Jiménez-Ojeda (2020), en que la contaminación de suelos debe ser vista como un fenómeno complejo e interconectado con otras formas de contaminación, como la del agua y el aire. Además, creemos que es esencial abordar este problema desde una perspectiva integral que no solo considere las técnicas de biorremediación, sino también estrategias preventivas, especialmente en zonas de alta vulnerabilidad como el Lote 192, donde las actividades extractivas intensivas han comprometido la salud del suelo, alterando sus capacidades ecológicas y afectando a las comunidades locales que dependen directamente de estos recursos.

Desechos generados por las actividades petrolíferas

Los desechos, independientemente de su estado físico (sólido, líquido o gaseoso), que presentan características peligrosas o están compuestos por sustancias peligrosas y que han perdido sus propiedades físicas y químicas útiles, son considerados peligrosos (Hernández, 2013).

En su estudio titulado “Gestión ambiental de desechos peligrosos generados por actividades de perforación direccional en el área Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco”, Hernández G. identifica varios tipos de desechos generados por las actividades de perforación de pozos (Hernández, 2013).

Entre las principales corrientes de desechos se encuentran:

- Desechos de perforación y desechos aceitosos
- Desechos sólidos industriales peligrosos
- Desechos líquidos industriales peligrosos
- Desechos sólidos industriales no peligrosos
- Efluentes líquidos / descargas operacionales
- Desechos domésticos} desechos hospitalarios
(corriente eventual)

Los desechos de perforación y desechos aceitosos incluyen:

- Arena producida
- Ripios de perforación
- Desechos químicos
- Cementos

Podemos afirmar que los residuos de perforación son subproductos generados durante las operaciones de perforación en sectores como la industria petrolera y minera.

Estos residuos incluyen materiales extraídos del subsuelo durante el proceso de perforación y otros subproductos resultantes de actividades asociadas, como la limpieza y mantenimiento de equipos.

Desechos sólidos industriales peligrosos

- Sólidos provenientes del sistema de recolección de aguas grises
- Trapos aceitosos
- Filtros de aceites drenados
- Paños, productos de papel y cualquier otro material absorbente contaminado con aceites, grasas y lodos base sintética.
- Baterías usadas
- Tambores vacíos contaminados
- Otros no especificados

Desechos líquidos industriales peligrosos

- Aceites usados: todos los aceites derivados de hidrocarburos, incluye aceite de motor, lubricantes y fluidos hidráulicos.
- Solventes usados

- Residuos de pintura
- Otros no especificados que se sospeche su naturaleza peligrosa

Desechos sólidos industriales no-peligrosos

- Latas de pinturas y pots vacíos de grasa lubricante.
- Envases de estaño y aluminio
- Chatarra ferrosa (brocas gastadas, protectores de sartas, guayas, revestidores de bombas y pistones, despojos de soldaduras, barriles de combustibles)
- Envolturas o sacos de químicos para lodos de cemento
- Bombonas de gas y otros no especificados

Efluentes líquidos/descargas operacionales

- Aguas negras
- Aguas grises
- Aguas residuales

Desechos domésticos

- Paletas de maderas no recuperables
- Papel y cartón no recuperables
- Vidrio
- Latas desechables
- Plásticos
- Desechos de comida

Desechos hospitalarios

Son generados de forma periódica como resultado de la implementación de servicios de primeros auxilios que se susciten en el módulo de primeros auxilios del taladro. Entre ellos tenemos:

- Jeringas
- Gasas impregnadas con fluidos humanos
- Guantes de látex descartables
- Residuos farmacéuticos
- Otros

Desechos químicos

La asociación de empresas de petróleo, gas y energía renovable

De América Latina y el Caribe en su “Guía para el Tratamiento y Eliminación de Desperdicios de Perforación de Exploración y Producción” nos dice que, los aditivos químicos que se usan en el sistema de lodo incluyen productos empaquetados (bentonita, baritina, cáustica y otros), posiblemente otros a granel (generalmente, sólo la bentonita y la baritina) y barriles. Se puede esperar que las otras sustancias químicas presentes en las concesiones puedan contener cemento (ya sea empaquetado o a granel) y aditivos de cemento. Para levantar los sacos y los barriles en los depósitos, se usan ascensores de carga con barros de acero que se encajan debajo de los bultos y se mezclan manualmente. Este proceso conduce a que los sacos se dañen y que los barriles derramen sus contenidos de sustancias químicas en estas áreas. La solución actual a estos derrames es que los productos se están lavando continuamente y luego terminan en los sumideros. Al finalizar un pozo, es una práctica común evaluar el valor de las sustancias químicas que sobran de la obra. En varios casos es más económico desechar estas sustancias que devolverlas o transferirlas al próximo pozo. Muchas veces se arrojan al sumidero o en caso de una perforación costa afuera, sen-

cillamente se tiran por la borda (Alconsult International LTD, 2005).

De lo anterior podemos concluir que, la perforación a menudo implica el uso de una variedad de productos químicos para mejorar la eficiencia del proceso. Estos productos químicos pueden incluir lubricantes, inhibidores de corrosión, biocidas y otros aditivos, generando residuos químicos que requieren una disposición adecuada.

Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos tienen como principal función modificarlos compuestos contaminantes y peligrosos mediante reacciones químicas, de esta forma lo que se busca es eliminar o neutralizar los elementos peligrosos; en otros casos no es posible eliminar por completo estos residuos, pero se realiza el tratamiento para reducir el riesgo que puedan presentar, hasta un punto en que puede ser posible su manejo y posterior disposición (Sacristán 2020). Estos se clasifican en oxidación química, extracción y estabilización/solidificación.

El primero emplea sustancias oxidantes para destruir los componentes contaminantes, transformándolos en dióxido de carbono y agua. Los agentes que actúan como oxidantes pueden ser: o permanganato (MnO_4), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el ozono. Se obtiene una efectividad

de degradación bastante altas. Las sustancias utilizadas en este proceso tienen características corrosivas, lo que indica riesgos para la salud humana y de explosión, debido a esto se deben tomar las precauciones necesarias de manejo de estas sustancias (Sacristán 2020).

En la extracción, los componentes orgánicos se disuelven en el solvente que con el corte se mezcla en un equipo que realiza la extracción del contaminante en el solvente. Se utilizan diferentes tipos de solventes depende de las características del material. Una vez terminada la extracción el solvente junto con la mezcla de contaminantes se calientan con el fin de facilitar la separación, el solvente se recupera y se recircula hacia el equipo extractor.

La técnica de estabilización/solidificación para el lodo y recorte de perforación lo que busca es estabilizar algunos componentes, adicionando al suelo cierta sustancia que controle e inhiba las reacciones químicas que se pudieran presentar. La estabilización consiste en la reducción del contaminante mediante una reacción química entre el agente estabilizador y el contaminante mientras que en la solidificación el compuesto contaminante se micro encapsula en una matriz sólida, con el fin de generar un producto inertizado. Entre los agentes estabilizadores se tienen: cemento y cal, asfalto emulsificador y el bitumen fundido (Sacristán 2020) (Silva Gutsens, 2023). *Tratamientos físicoquímicos*

Los tratamientos químicos tienen como principal función modificar los compuestos contaminantes y peligrosos mediante reacciones químicas. De esta forma, lo que se busca es eliminar o neutralizar los elementos peligrosos; en otros casos no es posible eliminar por completo estos residuos, pero se realiza el tratamiento para reducir el riesgo que puedan presentar, hasta un punto en que pueda ser posible su manejo y posterior disposición (Sacristán, 2020). Estos se clasifican en oxidación química, extracción y estabilización/solidificación (Díaz Rodríguez & Silva Gutsens, 2023)

Estabilización / Solidificación

Alarcón Sierra en su trabajo “Criterios básicos para normar los recortes de perforación generados por la industria petrolera en el estado de Veracruz” nos dice que, la estabilización es uno de los métodos de manejo para disposición en tierra de lodos y recortes de perforación consiste en la estabilización (también nombrada, solidificación y fijación) de los lodos seguido de su depósito en confinamiento controlado. La técnica de solidificación consiste en la adición de agentes químicos al lodo los cuales reaccionan para formar un material sólido que puede ser dispuesto.

Solidificación y estabilización son procesos de tratamiento usados para mejorar las características físicas y de mane-

jo de los residuos, disminuir el área de contacto con los contaminantes que puedan ser transferidos al lixiviado, limitar la solubilidad o detoxificar los constituyentes peligrosos (Alarcón Sierra, 2014).

Hernández (2013), en su trabajo “Gestión ambiental de desechos peligrosos generados por actividades de perforación direccional en el área Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco” nos dice que, la estabilización consiste en un proceso por medio del cual los contaminantes de un residuo son transformados en formas menos tóxicas, menos móviles o poco solubles. Las transformaciones se dan por medio de reacciones químicas que fijan los compuestos tóxicos en polímeros impermeables o en cristales estables. Los productos utilizados en este proceso permiten: mejorar las características físicas del residuo, disminuir el área superficial a través de la cual se transfieren contaminantes, reducir la solubilidad de los contaminantes, reducir la toxicidad y reducir los contaminantes. Por otro lado, la solidificación consiste en un tratamiento que genera una masa sólida monolítica de residuos tratados. De esta manera se mejora su integridad estructural, sus características físicas y se facilita su manejo, transporte y disposición final (Hernández, 2013).

Encapsulamiento de los residuos generados durante las actividades de perforación

El encapsulamiento es un proceso que incluye el completo recubrimiento o aislamiento de las partículas tóxicas, sólidos aglomerados con una nueva sustancia poniendo una capa impermeable entre el residuo y el medio ambiente.

El emulsificante tiene la función de romper la tensión superficial del hidrocarburo y por movimiento mecánico convierte a éste en esferas de 2–4 micras, rodeadas del emulsificante. Al agregar el silicato se forma un óxido de silicio amorfo, que tiene como características el no ser lixiviable, tener un 80% de agua y trazas de sal (cloruro de potasio), que dan un producto final cristalino y no tóxico (propiamente el micro encapsulado).

El producto final del tratamiento es almacenado a granel a cielo abierto y muestreado bajo las técnicas establecidas en la legislación nacional y el resultado se somete a autorización del municipio para su entrega.

Como resultado de estos métodos se obtiene la estabilización del contaminante a una fase sólida, más fácil de manejar, sin embargo, el residuo sigue presente y requiere de una disposición final ya que el resultante no tiene ya ningún uso hasta ahora (Alarcón Sierra, 2014).

Biotratamiento o biorremediación

En su trabajo “Biotecnologías aplicadas al tratamiento y remediación de rios de perforación”, Pilatásig Montaluisa (2018), define la biorremediación como el proceso de modificar la tasa de degradación natural de hidrocarburos mediante la adición de fertilizantes que proporcionan nitrógeno y fósforo. El tratamiento biológico de suelos contaminados implica el uso de microorganismos y/o plantas para descomponer los contaminantes orgánicos. La actividad geológica altera la estructura molecular del contaminante, y el grado de alteración determina si se ha producido biotransformación o mineralización.

Díaz Rodríguez y Silva Gutsens (2023), en su trabajo “Alternativa de reúso para cortes de perforación contaminados con diésel”, explican que los tratamientos biológicos se realizan mediante la acción de organismos vivos, generalmente bacterias y otros microorganismos. Estos métodos son aplicables a residuos peligrosos y no peligrosos, y consisten básicamente en la biodegradación de la materia orgánica, convirtiéndola en dióxido de carbono, agua y energía.

Hernández (2013), en su trabajo “Gestión ambiental de desechos peligrosos generados por actividades de perforación direccional en el área Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco”, describe la biorremediación

como un conjunto de técnicas biológicas que utilizan microorganismos naturales (hongos o bacterias) y plantas para descomponer sustancias peligrosas en otras menos tóxicas. Estos sistemas se basan en la digestión de sustancias orgánicas por ciertos microorganismos, que obtienen de ellas la fuente de carbono necesaria para el crecimiento de sus células y una fuente de energía para realizar sus funciones metabólicas. El metabolismo libera energía de los residuos orgánicos y utiliza el carbono para sintetizar nuevo material celular. La actuación secuencial de diversas enzimas degrada los residuos orgánicos en compuestos cada vez más simples, como hidrocarburos a alcoholes, alcoholes a ácidos orgánicos, y estos a dióxido de carbono, agua y masa celular. Las técnicas de biotratamiento pueden emplearse para descontaminar suelos y aguas, y se clasifican en dos categorías principales: *in situ* y *ex situ*. El biotratamiento *in situ* trata el suelo contaminado o el agua subterránea en el lugar donde se encuentra, mientras que el biotratamiento *ex situ* implica excavar el suelo contaminado o extraer agua subterránea mediante bombeo para aplicar el tratamiento.

In situ:

- Biolabranza (landfarming)
- Compostaje
- Biopilas
- Biorreactores
- Fitorremediación

En su “Guía para el Tratamiento y Eliminación de Desperdicios de Perforación de Exploración y Producción”, Alconsult International LTD (2005), describe el bioreacondicionamiento como un conjunto de métodos de tratamiento que emplean microorganismos para absorber contaminantes presentes en agua, suelo o diversos productos contaminados. Este término se utiliza a veces para referirse al tratamiento de tierras contaminadas. En el caso de tierras contaminadas por petróleo, derrames o tanques de almacenamiento subterráneo, la cantidad de microorganismos naturales en el suelo suele ser insuficiente para descomponer los altos niveles de hidrocarburos en un tiempo económicamente viable. Factores ecológicos como la temperatura y la oxigenación afectan la cantidad y actividad de los microorganismos, y dependiendo de las condiciones del lugar, es necesario reforzarlos para lograr su objetivo. El bioreacondicionamiento selecciona tipos de microorganismos naturales adaptados específicamente para descomponer hidrocarburos en tierras contaminadas. El generador del desecho debe asegurarse de que el residuo sea adecuado para el proceso de bioremediación y que este se realice de manera ambientalmente aceptable.

Hay que asegurar:

- Asegurarse de que el residuo no contenga componentes que puedan obstaculizar o impedir el proceso biológico.

- Verificar que el residuo no tenga niveles elevados de metales pesados que puedan afectar los procesos metabólicos de las bacterias.
- Definir y proporcionar los nutrientes suplementarios necesarios durante el proceso.
- Garantizar que el producto resultante del biore acondicionamiento sea apto para ser reintroducido en el medio ambiente.
- Asegurarse de que el lugar donde se realizará el biore acondicionamiento, si es “in situ”, esté protegido y no haya riesgo de contaminación de aguas superficiales o subterráneas durante el proceso.
- Mantener registros detallados del tipo, cantidad y nivel de contaminantes del residuo a tratar.

El biore acondicionamiento in situ no debe ser visto como una solución sencilla y económica para eliminar sólidos. Este proceso puede ser bastante complicado de controlar y ejecutar para garantizar resultados satisfactorios. Solo debe considerarse después de realizar los análisis geotécnicos e hidrogeológicos apropiados del sitio, así como los análisis químicos y microbiológicos necesarios.

Biotratamiento In Situ

Según la “Guía para el Tratamiento y Eliminación de Desperdicios de Perforación de Exploración y Producción” de Alconsult International LTD (2005), el tratamiento biológico de sólidos en el sitio emplea sistemas extensivos de aeración para reducir y extraer contaminantes orgánicos biodegradables, y su uso debe limitarse a los lodos a base de petróleo. Este proceso incluye la degradación biológica natural de hidrocarburos, lograda mediante la mezcla constante, el cultivo con arado rotatorio y la rotación de los sólidos contaminados para mejorar la aeración. Esta técnica se aplica con el permiso de las autoridades locales para tratar los residuos de pozos perforados con lodos a base de petróleo.

Aproximadamente el 90% o más de los materiales orgánicos se extraen y se convierten en ácido carbónico y agua, o en nuevos sólidos biológicos. En condiciones ideales, la aeración prolongada continuará oxidando la masa de lodo para convertirla en ácido carbónico y agua, evitando la acumulación neta de lodo. Sin embargo, se sabe por experiencia que aproximadamente el 25% de los sólidos biológicos producidos son inertes a la oxidación biológica y, por lo tanto, se acumulan en el sistema. El exceso de lodo se recoge, se desagua y, después de pasar las pruebas de clasificación, generalmente es adecuado para relleno industrial.

El tipo de tratamiento biológico es generalmente específico al lugar y al tipo de desecho. Además, los tratamientos biológicos deben ser controlados de cerca para mantener su eficiencia.

Bioventilación

El proceso de inyección de aire a una velocidad específica en el área contaminada mejora la biodegradación en el sitio y reduce o elimina los gases volátiles que contaminan la atmósfera. Este método introduce aire únicamente en la zona no saturada o vadosa. La bioventilación descompone los contaminantes orgánicos menos volátiles y, debido a la disminución del volumen de aire, permite tratar suelos menos permeables. Este proceso es más efectivo en productos de petróleo livianos, como el diésel, hasta productos ligeros que tienden a volatilizarse rápidamente (Hernández, 2013).

Aireación en superficie

Este proceso consiste en inyectar aire atmosférico a presión en la zona saturada para volatilizar los contaminantes en las áreas subterráneas y fomentar la biorremediación al incrementar las concentraciones de oxígeno en el subsuelo. Se utiliza principalmente para tratar aguas contaminadas (Hernández, 2013).

La inyección de aire atmosférico en la zona saturada es una técnica de biorremediación que se emplea para tratar contaminantes presentes en aguas subterráneas. Este proceso, conocido como aireación en superficie, tiene como objetivo principal aumentar las concentraciones de oxígeno en el subsuelo, lo que facilita la degradación de los contaminantes por medio de microorganismos presentes en el medio.

Sus principales características y beneficios son:

- Volatilización de contaminantes

La inyección de aire bajo presión ayuda a volatilizar los contaminantes, es decir, los convierte en gases que pueden ser más fácilmente eliminados.

- Incremento de oxígeno

Al aumentar las concentraciones de oxígeno en el subsuelo, se promueve la actividad de los microorganismos que descomponen los contaminantes orgánicos.

- Aplicación en aguas contaminadas

Este método es especialmente útil para tratar aguas subterráneas contaminadas, mejorando su calidad y reduciendo los riesgos ambientales

Respecto a las consideraciones a tomar en cuenta:

- Presión de inyección

La presión con la que se inyecta el aire debe ser cuidadosamente controlada para asegurar una distribución uniforme y efectiva del oxígeno en la zona saturada.

- Monitoreo

Es esencial realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de oxígeno y de los niveles de contaminantes para evaluar la eficacia del tratamiento y ajustar los parámetros según sea necesario.

- Permisos y regulaciones

La implementación de esta técnica requiere permisos de las autoridades locales y debe cumplir con las regulaciones ambientales vigentes

Este método de biorremediación es una opción viable y efectiva para la recuperación de aguas subterráneas contaminadas, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública.

Biotratamiento Ex Situ

Compostaje

El compostaje es una técnica de biotratamiento similar a la biolabranza, pero con un tiempo de biodegradación más corto debido a las mejores condiciones de aireación, humedad y porosidad. En este proceso, el material contaminado se mezcla con sustancias orgánicas fácilmente degradables, como estiércol, paja fresca, astillas de madera y tusas de maíz, formando pilas de aproximadamente 3 metros de altura. La materia orgánica añadida aumenta la porosidad de la pila, facilitando el flujo de aire. Esta técnica también puede aplicarse a los recortes de perforación, mezclándolos con agentes voluminosos como trocillos de madera seca o paja para incrementar la porosidad. La mezcla se coloca en forma apilada, reteniendo el calor producido por la actividad microbiana que precede a la biodegradación. El agente voluminoso añadido mejora la capacidad de retención de agua, permeabilidad y porosidad, permitiendo la remediación rápida de grandes volúmenes de recortes contaminados con aceite mediante biotratamientos mejorados (bioapilamientos).

El compostaje es una técnica de biotratamiento que se utiliza para la degradación de materiales orgánicos contaminados. Este proceso se basa en la descomposición natural de la materia orgánica por microorganismos, principal-

mente bacterias y hongos, que transforman los contaminantes en productos menos tóxicos y más manejables.

Sus principales características son:

1. **Mejora de condiciones:** el compostaje mejora las condiciones de aireación, humedad y porosidad, lo que acelera la biodegradación de los contaminantes.
2. **Uso de sustancias orgánicas:** se mezclan materiales contaminados con sustancias orgánicas fácilmente degradables, como estiércol, paja fresca, astillas de madera y tusas de maíz, para formar pilas de compostaje.
3. **Incremento de porosidad:** la materia orgánica añadida aumenta la porosidad de la pila, facilitando el flujo de aire y mejorando la eficiencia del proceso.
4. **Retención de calor:** La mezcla se coloca en forma apilada, lo que retiene el calor producido por la actividad microbiana y acelera la biodegradación.
5. **Capacidad de remediación:** el compostaje permite la remediación rápida de grandes volúmenes de recortes contaminados con aceite mediante biotratamientos mejorados (bioapilamientos).

Se deben tener las siguientes consideraciones técnicas:

- **Altura de las pilas:** las pilas de compostaje suelen tener una altura de aproximadamente 3 metros para asegurar una adecuada aireación y descomposición.
- **Agentes voluminosos:** la adición de agentes voluminosos como trocillos de madera seca o paja mejora la porosidad y la capacidad de retención de agua de la pila.
- **Monitoreo:** es esencial realizar un monitoreo continuo de las condiciones de aireación, humedad y temperatura para asegurar la eficiencia del compostaje.
- **Permisos y regulaciones:** la implementación de esta técnica requiere permisos de las autoridades locales y debe cumplir con las regulaciones ambientales vigentes.

El compostaje es una opción viable y efectiva para la degradación de materiales orgánicos contaminados, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública.

Fitorremediación

La fitorremediación es un método de tratamiento que emplea plantas para descontaminar suelos, aguas superficiales y aguas subterráneas contaminadas con metales tóxicos, compuestos orgánicos, inorgánicos y radioactivos. Este proceso involucra mecanismos biológicos, químicos y físicos realizados por las plantas, que permiten la adsorción, secuestro y metabolismo de los contaminantes. Algunas plantas, como *Thlaspi caerulescens*, *Viola calaminaria*, *Arabidopsis thaliana*, *Brassica juncea* y *Astragalus bisculatus*, tienen la capacidad de acumular metales en sus tejidos, capturar y degradar plaguicidas o hidrocarburos del suelo y aguas subterráneas, ya sea por sí mismas o mediante la acción de bacterias que viven en sus raíces. Las plantas liberan enzimas en el suelo que descomponen los contaminantes (Hernández, 2013).

La fitorremediación es una técnica de biorremediación que utiliza plantas para limpiar ambientes contaminados. Este método es especialmente útil para tratar suelos y aguas contaminadas con metales pesados, compuestos orgánicos y otros contaminantes. Las plantas actúan como filtros naturales, absorbiendo y acumulando los contaminantes en sus tejidos, lo que facilita su eliminación del medio ambiente.

Sus principales características y beneficios son:

1. **Adsorción y acumulación:** las plantas pueden adsorber y acumular contaminantes en sus raíces, tallos y hojas, lo que permite la extracción de estos del suelo y agua.
2. **Degradación de contaminantes:** algunas plantas liberan enzimas que descomponen los contaminantes en el suelo, transformándolos en sustancias menos tóxicas.
3. **Mejora del suelo:** la fitorremediación puede mejorar la estructura y calidad del suelo, aumentando su porosidad y capacidad de retención de agua.
4. **Bajo costo:** comparado con otros métodos de remediación, la fitorremediación es relativamente económica y fácil de implementar.
5. **Sostenibilidad:** este método es ecológico y sostenible, ya que utiliza procesos naturales para la descontaminación.

Dentro de las consideraciones técnicas a tener en cuenta tenemos:

- **Selección de plantas:** es crucial seleccionar las plantas adecuadas para cada tipo de contaminante y condiciones del sitio. Algunas plantas son más eficaces para ciertos contaminantes que otras.
- **Condiciones del sitio:** las condiciones del suelo, clima y disponibilidad de agua deben ser consideradas para asegurar el éxito de la fitorremediación.
- **Monitoreo:** Es necesario realizar un monitoreo continuo para evaluar la eficacia del proceso y ajustar las condiciones según sea necesario.
- **Disposición de plantas contaminadas:** las plantas que han acumulado contaminantes deben ser manejadas y dispuestas adecuadamente para evitar la recontaminación.

La fitorremediación es una técnica prometedora para la limpieza de ambientes contaminados, ofreciendo una solución natural y sostenible para la gestión de residuos y la protección del medio ambiente.

Landfarming

La biolabranza, también conocida como landfarming, es una técnica de biotratamiento en la que los desechos contaminados se mezclan con suelo limpio. Este proceso estimula la oxidación del material contaminante al fomentar el crecimiento de la microflora natural del suelo mediante la adición de fertilizantes, el arado y el riego superficial. La mezcla de desechos y suelo se apila, se mueve y se airea utilizando equipos agrícolas comerciales como tractores, arados, mangueras de riego y aspersores rotativos, proporcionando oxígeno a los microorganismos presentes y estimulando su crecimiento (Hernández, 2013). Además, el landfarming es una tecnología de biorremediación ex-situ que requiere la excavación de los suelos contaminados y su disposición sobre una superficie impermeable, como una geomembrana, que se coloca sobre el terreno adyacente a la zona contaminada o en una piscina excavada cerca de esta zona. Este proceso también incluye un sistema de drenaje para la recolección de lixiviados, que deben recibir un tratamiento posterior (Pilatásig Montaluisa, 2018).

La biolabranza es una técnica ampliamente utilizada para la remediación de suelos contaminados, especialmente en la industria petrolera. Este método aprovecha la capacidad natural de los microorganismos del suelo para descomponer los contaminantes orgánicos, transformándolos

los en sustancias menos tóxicas y más manejables.

Sus principales características y beneficios son:

1. **Estimulación de la microflora:** la adición de fertilizantes y el riego superficial fomentan el crecimiento de microorganismos que descomponen los contaminantes.
2. **Mejora de la aireación:** el uso de equipos agrícolas para mover y airear la mezcla de suelo y desechos mejora la disponibilidad de oxígeno, lo que es crucial para la actividad microbiana.
3. **Reducción de contaminantes:** la biolabranza es efectiva para reducir la concentración de contaminantes orgánicos en el suelo, como hidrocarburos y plaguicidas.
4. **Aplicación ex-situ:** este método se realiza fuera del sitio original de contaminación, lo que permite un control más preciso del proceso y minimiza el riesgo de dispersión de contaminantes.

Dentro de las consideraciones técnicas a tener en cuenta tenemos:

- **Superficie impermeable:** es esencial utilizar una geomembrana o una superficie impermeable

para evitar la infiltración de contaminantes en el suelo subyacente.

- **Sistema de drenaje:** la recolección y tratamiento de lixiviados es crucial para evitar la contaminación de aguas subterráneas.
- **Monitoreo:** es necesario realizar un monitoreo continuo de las condiciones del suelo, como la humedad, la temperatura y la concentración de oxígeno, para asegurar la eficacia del proceso.
- **Permisos y regulaciones:** la implementación de la biolabranza requiere cumplir con las regulaciones ambientales y obtener los permisos necesarios de las autoridades locales.

La biolabranza es una opción viable y efectiva para la remediación de suelos contaminados, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública.

Biopilas

Las biopilas consisten en la creación de montones de material biodegradable que no superan los 2 metros de altura. Estos montones están compuestos por suelo contaminado y materia orgánica, y se mantienen en condiciones óptimas para facilitar la biodegradación de los contaminantes. La aireación de estas pilas puede realizarse

de manera activa, volteando el montón, o de forma pasiva, utilizando tubos perforados para la ventilación. Este método es especialmente eficaz para tratar compuestos orgánicos ligeros. Los hidrocarburos presentes en el ripio deben ser no halogenados y encontrarse en concentraciones inferiores a 50.000 ppm (Hernández, 2013).

Las biopilas son una técnica de biorremediación que se utiliza para tratar suelos contaminados con hidrocarburos y otros compuestos orgánicos. Este método aprovecha la capacidad de los microorganismos presentes en el suelo para descomponer los contaminantes en productos menos tóxicos.

Las ventajas de las biopilas son:

1. **Eficiencia:** son efectivas para la degradación de compuestos orgánicos ligeros.
2. **Flexibilidad:** pueden ser aireadas de manera activa o pasiva, lo que permite adaptarse a diferentes condiciones y necesidades.
3. **Sostenibilidad:** utilizan procesos naturales para la degradación de contaminantes, reduciendo la necesidad de tratamientos químicos.

Dentro de las consideraciones tenemos:

- **Condiciones** óptimas: es crucial mantener condiciones favorables para la actividad microbiana, como la humedad, temperatura y pH adecuados.
- **Monitoreo:** es necesario realizar un seguimiento constante para asegurar que los niveles de contaminantes se reduzcan a niveles seguros.

Biorreactores

Los biorreactores de suspensión son empleados en la biorremediación de suelos contaminados. En este proceso, los suelos o lodos contaminados se introducen en un reactor que contiene una cantidad suficiente de agua para permitir una mezcla continua. Para optimizar la biorremediación, se suelen añadir nutrientes, tanto orgánicos como inorgánicos, y se controlan parámetros como el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto. Además, es importante mencionar que la eficiencia de los biorreactores de suspensión puede verse influenciada por la naturaleza de los contaminantes presentes y las características del suelo o lodo tratado. La adición de microorganismos específicos que degraden los contaminantes también puede mejorar significativamente el proceso de biorremediación. Este

enfoque biotecnológico no solo es efectivo para la limpieza de suelos, sino que también es una alternativa sostenible y ecológica en comparación con métodos tradicionales de descontaminación.

Biorize

Biorize es una técnica que permite estimular la actividad de los microorganismos mediante el uso de mejoradores orgánicos en forma de biomasa vegetal. Esta biomasa se compone de diferentes partes de plantas en proporciones específicas, proporcionando nutrientes esenciales, especialmente nitrógeno. Además de su contenido en nitrógeno y otros nutrientes, las biomasas vegetales mejoran las características del desecho al aumentar su porosidad, lo que facilita el intercambio de oxígeno.

Es importante destacar que la biomasa vegetal no solo aporta nutrientes, sino que también mejora la estructura física del desecho, lo que puede ser crucial para la eficiencia del proceso de biorremediación. La porosidad incrementada permite una mejor circulación de aire y agua, creando un ambiente más favorable para los microorganismos. Además, el uso de biomasa vegetal es una opción sostenible y ecológica, ya que utiliza recursos naturales y puede reducir la dependencia de productos químicos sintéticos.

Landspreading

El esparcimiento, conocido también como *landspreading*, es una técnica utilizada para la dispersión de residuos sólidos sobre un área específica con el objetivo de mejorar la calidad del suelo o mantener su condición para futuros usos. Según Hernández G. en su trabajo “Gestión ambiental de desechos peligrosos generados por actividades de perforación direccional en el área Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco”, este método se aplica principalmente a residuos sólidos de baja a media toxicidad y se realiza en una sola aplicación, a diferencia de la biolabranza.

Alarcón Sierra, en su estudio “Criterios básicos para normar los recortes de perforación generados por la industria petrolera en el estado de Veracruz”, menciona que esta técnica también se utiliza para tratar recortes y residuos contaminados con fluidos de emulsión inversa (OBF). En este proceso, se aplican bacterias oleofílicas que se alimentan de hidrocarburos, produciendo alcoholes, aldehídos y ácidos orgánicos como productos intermedios, y agua, dióxido de carbono y más bacterias oleofílicas como productos finales.

La dispersión sobre terreno es un proceso biológico aerobio que se basa en la presencia natural de bacterias en

el suelo para degradar los hidrocarburos presentes en el lodo o recortes. Este proceso se lleva a cabo mediante un procedimiento controlado, aplicando los residuos entre una profundidad de 30 a 60 cm y añadiendo una mezcla de nutrientes inorgánicos como nitrógeno, potasio y fósforo. La mezcla se realiza utilizando rastras agrícolas accionadas por tractor.

Además, es importante destacar que el esparcimiento sobre terreno no solo mejora la calidad del suelo, sino que también puede contribuir a la reducción de la toxicidad de los residuos aplicados. Este método es una alternativa sostenible y ecológica en comparación con otros métodos de disposición de residuos, ya que utiliza procesos naturales para la degradación de contaminantes y puede ser implementado en diversas áreas, tanto en el sitio de generación de residuos como fuera de él.

Confinamiento

El confinamiento consiste en enterrar y sellar los residuos de perforación en una fosa. Según el decreto 2635 “Normas para el control y recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos sólidos (1998)”, esta práctica debe cumplir con varias condiciones específicas. En primer lugar, el área destinada para la disposición final no debe ser susceptible a inundaciones y debe contar con una capa o membrana impermeabilizante en sus pare-

des, fondo y tope. Además, los desechos deben mezclarse con suelo autóctono u otro material absorbente que les proporcione la resistencia y compactación necesarias para igualar las características del suelo circundante. Es crucial que la mezcla resultante de suelo y desecho no supere el 50% de humedad, y que el tope de esta mezcla se encuentre al menos a un metro de la superficie. Finalmente, el área de confinamiento debe sellarse con suelo y restablecer la cobertura vegetal, utilizando preferiblemente plantas nativas que no sean frutales y que se adapten a las condiciones locales.

Además de estas condiciones, es importante considerar que el confinamiento de residuos peligrosos debe realizarse en áreas geológicamente estables para evitar cualquier riesgo de filtración o contaminación de las aguas subterráneas. La selección del sitio debe incluir estudios detallados de la geología, hidrología y ecología del área para garantizar que el confinamiento sea seguro y sostenible a largo plazo. También es recomendable implementar sistemas de monitoreo ambiental para detectar cualquier posible fuga o impacto ambiental, y tomar medidas correctivas de inmediato si es necesario. Este enfoque integral no solo asegura la protección del medio ambiente, sino que también cumple con las normativas legales y promueve prácticas responsables en la gestión de residuos.

Drillacsoil

Drillacsoil es una tecnología de esparcimiento desarrollada por Intevep, diseñada para tratar desechos de perforación base agua y otros residuos con concentraciones de hidrocarburos inferiores al 1%. Esta tecnología se fundamenta en el conocimiento detallado de las propiedades químicas del suelo, lo que permite disponer los desechos en dosis adecuadas para cumplir con las normativas ambientales vigentes.

Además, es importante destacar que Drillacsoil no solo se enfoca en la disposición adecuada de los desechos, sino que también busca mejorar la calidad del suelo receptor. Al aplicar los desechos en las dosis correctas, se puede evitar la acumulación excesiva de contaminantes y promover un entorno más saludable para la flora y fauna locales. Esta tecnología también puede ser adaptada para diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales, lo que la hace versátil y aplicable en diversas regiones.

La implementación de Drillacsoil puede contribuir significativamente a la sostenibilidad ambiental, ya que reduce la necesidad de métodos de disposición más invasivos y costosos. Además, al cumplir con las normativas ambientales, se minimizan los riesgos de sanciones y se promueve una gestión responsable de los residuos.

Métodos de remediación aplicados a la Amazonía peruana

Pirólisis al vacío.

Consiste en un proceso termoquímico que degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este método ha demostrado ser efectivo y rápido para remediar suelos amazónicos altamente contaminados con hidrocarburos intemperizados, logrando una remoción de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) mayor al 99.99%.

El pirólisis es la descomposición térmica de un sólido en ausencia de agentes oxidantes como el oxígeno o cuando hay una cantidad significativamente menor de oxígeno que la requerida para la combustión completa. Se caracteriza principalmente por la degradación térmica de los hidrocarburos, lo que implica la ruptura de los enlaces carbono – carbono y la formación de enlaces carbono – oxígeno. Durante el calentamiento de las partículas del sólido, la temperatura se incrementa localmente, primero ocurre la evaporación de la humedad (etapa de secado) y luego se liberan progresivamente los volátiles. Los productos del pirólisis pueden ser gaseosos, líquidos y/o sólidos. El líquido resultante del pirólisis, generalmente conocido como biopetróleo, es un combustible líquido renovable formado por varios compuestos orgánicos y agua, al sólido

do o carbonizado rico en carbono se le denomina biochar o biocarbón y los gases incondensables están formados principalmente por CO₂, CO, H₂ y CH₄. La producción de líquidos requiere un calentamiento rápido del sólido hasta una temperatura determinada, llamada temperatura de pirólisis que se ubica entre 400 a 550 °C y mantenerla en esas condiciones durante un tiempo específico denominado tiempo de residencia que favorezca el retiro de los compuestos volátiles de la zona de reacción. (Petrell et al., 2021).

Biorremediación

La Biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, y, por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas (Suarez Beltrán, 2013).

Tipos de biorremediación:

- **Biosorción:** es la remoción de metales pesados contenidos en soluciones acuosas mediante la unión a biomasa. Se conoce una variedad de biomateriales que pueden unirse a estos contaminantes, como bacterias, hongos, algas y residuos industriales y agrícola.

- **Bioprecipitación:** se utilizan microorganismos capaces de generar metabolitos que precipitan con muchos de los metales pesados. Un grupo importante de estos microorganismos son las bacterias sulfato reductoras. Estas bacterias anaeróbicas son capaces de formar sulfuros a partir de la reducción de sulfatos, lo que permite, debido a la habitual baja solubilidad de los primeros, separarlos del medio líquido.
- **Bioaumentación:** esta técnica funciona en condiciones de laboratorio o biorreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores. Presencia de toxinas, nutrientes y condiciones ambientales, movilidad y/o distribución de los microorganismos y la presencia de abundante materia orgánica. Los microorganismos añadidos deben sobrevivir a los depredadores y competir con éxito con la población autóctona antes de ocupar los nichos potenciales. En general, los ambientes más selectivos y la utilización de consorcios microbianos favorecen la bioaumentación (Suarez Beltrán, 2013).
- **Biodisponibilidad:** la tasa de degradación depende tanto de la capacidad de transporte y del metabolismo microbiano, como de la transferencia de masas del compuesto. La relación entre estos factores se conoce como biodisponibilidad. En

los suelos uno de los factores limitantes para la biodegradación es la transferencia de masas, ya que los microorganismos de los suelos contaminados suelen tener amplias capacidades biodegradativas al estar expuestos a una gran variedad de compuestos orgánicos diferentes. Por lo tanto, la adsorción, la absorción, la desadsorción, la disolución y la difusión son fenómenos, propios de la transferencia de masas, que condicionan la biodisponibilidad de los contaminantes (Suarez Beltrán, 2013).

- **Biorremediación con plantas.** Este método aprovecha la capacidad de algunas especies vegetales para absorber, acumular o transformar los contaminantes del suelo. Este método es más ecológico y económico que otros, pero requiere más tiempo y espacio. Algunas plantas que se han usado para este fin son el vetiver, el pasto bermuda y el pasto elefante (Ramirez Silva et al., 2021).
- **Recuperación y restauración de áreas degradadas por minería aurífera.** Los expertos del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, entidad adscrita al Minam, elaboró una guía práctica para abordar esta problemática ambiental en busca de recuperar la salud del suelo mediante la siembra de cultivos de cober-

tura leguminosa y la posterior reforestación con plantas de alto valor ecológico y económico. Este método tiene un enfoque ecosistémico y brinda las orientaciones para la restauración efectiva de bosques (Ministerio del Ambiente, 2022).

Glosario de términos básicos

Agente contaminante

Toda sustancia, elemental o molecular, natural o de síntesis artificial, o aporte energético o de materia ionizante, que es incorporado a los ambientes naturales, artificiales y/o antrópicos, como residuos de actividades humanas de cualquier naturaleza.

Ambiente

Conjunto de componentes e influencias biológicas. Físicas, químicas y sociales dentro de las que se desarrolla un ser vivo

Aspecto ambiental

Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que pueden interactuar con el medio o ambiente.

Bioacumulación

Acumulación de elementos o sustancias tóxicas o nocivas dentro de los organismos de los seres vivos.

Biomasa

Cantidad total de materia viviente en un momento dado en un área determinada.

Ecología

Ciencia que estudia a los organismos en su propio hábitat, y las relaciones que mantienen los seres vivos con su entorno.

Estándar de calidad ambiental (ECA)

Es un indicador de la calidad ambiental que mide la concentración de elementos y sustancias en los componentes ambientales para determinar su deterioro o conservación, con la finalidad de resguardar la calidad del ambiente y la salud humana

Estudio de impacto ambiental

Es un estudio técnico, de carácter multidisciplinario, que incorporado en el procedimiento del EIA está destinado a la predicción, identificación e interpretación de los impactos ambientales y a la descripción de la o las acciones que se ejecutarán para impedir o minimizar sus efectos adversos

Factor ambiental

Componentes del medio o ambiente entre los cuales se desarrolla la vida en nuestro planeta.

Impacto ambiental

Cualquier cambio en el medio o ambiente, sea adverso o beneficioso, total o parcial resultante de las actividades, productos o servicios de una organización.

Límite máximo permisible (LMP)

Medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan una emisión y que, al ser superados, causan daño a la salud y el ambiente.

Medidas de mitigación

Corresponde a las recomendaciones que el estudio de impacto ambiental efectúa a fin de reducir, neutralizar o eliminar los impactos ambientales principales de un proyecto.

Pasivos ambientales

Son considerados como pasivos ambientales los pozos e instalaciones mal abandonados, los suelos contaminados, los efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos ubicados en cualquier lugar del territorio nacional, incluyendo el zócalo marino, producidos como consecuencia de operaciones en el subsector hidrocarburos, realizadas por parte de empresas que han cesado sus actividades en el área donde se produjeron dichos impactos (Artículo 2 de la Ley N° 29134).

Resiliencia

Capacidad de un medio o ambiente para recuperarse y volver a su estado base de equilibrio luego de haber sufrido un impacto.

Marco referencial

- Ley N° 28611. Ley General del Ambiente
- Ley N° 28245. Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental
- Ley N° 27446. Ley de Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)
- D.S. 019-2009-MINAM. Reglamento de la Ley SEIA
- Ley 29968. Servicio de Certificación Ambiental (SENACE)
- D.S.002-2008-MINAM. Aprueban los estándares nacionales de calidad ambiental para agua
- D.S.004-2017-MINAM. Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias.
- D.S.037-2008-PCM. Establecen límites máximos permisibles para efluentes líquidos para el subsector de hidrocarburos.
- ISO 14001. Norma Internacional para Sistemas de Gestión Ambiental

Proposiciones orientadoras de la investigación

Proposición general

El análisis integral de las condiciones ambientales del Lote 192 permitirá determinar la tecnología de remediación más adecuada para recuperar las zonas afectadas, considerando la naturaleza de los contaminantes presentes, las características del suelo amazónico y la viabilidad técnica y económica de las alternativas disponibles. Esta determinación se fundamenta en la comparación sistemática de los resultados obtenidos mediante la aplicación de diferentes técnicas de biorremediación en condiciones controladas, así como en la evaluación de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo y metales pesados en los suelos de las cuencas de los ríos Pastaza, Corrientes y Tigre. La selección de la tecnología más apropiada requiere considerar no solo la eficiencia en la remoción de contaminantes, sino también los tiempos de tratamiento, los costos asociados y la disponibilidad de recursos técnicos y humanos para su implementación en el contexto amazónico.

Proposiciones específicas

La contaminación causada por los derrames de petróleo crudo en los suelos del Lote 192 genera deterioros significativos en la calidad de estos, alterando sus propiedades físicas, químicas y biológicas de manera que comprometen su capacidad para sustentar la vida vegetal, animal y microbiana. La introducción de hidrocarburos en el suelo reduce la porosidad y la capacidad de infiltración del agua, afecta los procesos de aireación y drenaje, y provoca la pérdida de materia orgánica y nutrientes minerales esenciales para el crecimiento de las plantas. La presencia de metales pesados como bario, cadmio, plomo, cromo y mercurio agrava la situación, ya que estos elementos pueden acumularse en los tejidos de los organismos vivos y entrar en la cadena alimentaria, exponiendo a las poblaciones humanas a riesgos de salud que van desde intoxicaciones agudas hasta efectos crónicos como alteraciones endocrinas y cáncer.

La efectividad de los métodos de remediación evaluados se determinará por el porcentaje de hidrocarburos recuperados de las zonas contaminadas, permitiendo establecer comparaciones rigurosas entre las diferentes técnicas y seleccionar aquella que ofrezca la mejor combinación de eficiencia, tiempo de tratamiento y sostenibilidad ambiental para las condiciones específicas del área de estu-

dio. La evaluación de la eficiencia de cada técnica considera las fracciones de hidrocarburos totales de petróleo, así como las concentraciones de metales pesados presentes en el suelo antes y después del tratamiento. Los resultados de esta comparación permitirán identificar la técnica que ofrezca la mayor reducción de contaminantes en el menor tiempo posible, considerando además la viabilidad económica y la disponibilidad de recursos para su implementación en el contexto amazónico.

Capítulo 3

Enfoque metodológico para la evaluación ambiental y la selección de técnicas de remediación

BAJO LA SOMBRA DEL PETRÓLEO

Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la
Amazonía peruana

Fundamentación del enfoque cuantitativo y del diseño descriptivo no experimental

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, lo que permite medir los impactos y daños ambientales utilizando datos numéricos y estadísticos que proporcionan una base objetiva para la evaluación de la contaminación y la comparación de las técnicas de remediación. La elección de este enfoque responde a la naturaleza de los objetivos planteados, que requieren la cuantificación de las concentraciones de contaminantes en el suelo y la determinación de la eficiencia de diferentes métodos de biorremediación en términos de porcentajes de remoción de hidrocarburos. Un enfoque cualitativo habría resultado insuficiente para capturar la magnitud y la distribución espacial de la contaminación, así como para establecer comparaciones rigurosas entre las alternativas de remediación evaluadas. La combinación de técnicas cuantitativas de análisis químico con métodos estadísticos de procesamiento de datos permite construir una imagen precisa y matizada de la situación ambiental del área de estudio.

El diseño de la investigación es no experimental, ya que se realizó la recopilación, revisión y análisis de las evaluaciones ambientales tomadas en el área de estudio sin manipular las variables independientes. Este diseño resulta

apropiado para el estudio de fenómenos que ya han ocurrido y cuyas condiciones no pueden ser controladas por el investigador, como es el caso de la contaminación por hidrocarburos en el Lote 192. La investigación se basa en el análisis de informes de evaluación ambiental emitidos por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, que constituyen registros oficiales de las condiciones del suelo y los sedimentos en diferentes puntos de muestreo. El nivel de la investigación es descriptivo, ya que se busca describir y documentar las condiciones actuales del área del Lote 192, identificando los tipos de contaminantes presentes, sus concentraciones y su distribución espacial en las diferentes cuencas hidrográficas que atraviesan el lote.

La metodología propuesta por Hernández Sampieri en su libro “Metodología de la investigación” en su quinta edición proporciona el marco general para el desarrollo de la investigación. Este enfoque metodológico comprende una serie de etapas secuenciales que van desde la concepción de la idea de investigación hasta la elaboración del reporte de resultados, pasando por el planteamiento del problema, la revisión de la literatura, la visualización del alcance del estudio, la elaboración de hipótesis y la definición de variables, el desarrollo del diseño de investigación, la definición y selección de la muestra, la recolección de datos, el análisis de los datos y la interpretación de los resultados. La aplicación rigurosa de estas etapas garan-

tiza la coherencia y la validez del proceso investigativo, asegurando que cada paso esté fundamentado en el anterior y que los resultados obtenidos sean consistentes con los objetivos planteados.

Procedimientos de recolección y análisis de información ambiental

Para la presente investigación se recopiló y verificó una amplia variedad de fuentes, entre ellas documentos académicos, informes técnicos, notas periodísticas y casos prácticos relacionados con la gestión de derrames de hidrocarburos en el Lote 192. Además, se tomó en consideración el tema de remediación ambiental, integrando la perspectiva de todos los actores involucrados, ya sea de manera directa e indirecta. Para determinar la población de estudio se establecieron ciertos parámetros que guiaron la selección de las fuentes de información. El primero de estos parámetros fue la actualidad de la información, delimitando la investigación a informes de los últimos cinco años, de 2019 a 2023, con el fin de garantizar la vigencia de los datos y la relevancia de los hallazgos para la situación actual del área de estudio. El segundo parámetro fue la naturaleza técnica y normativa de los informes, utilizándose más de 100 informes oficiales generados por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, que constituyen la fuente más confiable y sistemática de

información sobre las condiciones ambientales del Lote 192. El tercer parámetro fue la inclusión de trabajos de investigación, evaluándose tesis con contenido en tecnologías de remediación y evaluación ambiental en el Lote 192.

El estudio abarcó un período de cinco años, desde 2019 hasta 2023, y se centró en tres ríos principales que atraviesan el Lote 192: el río Pastaza, el río Corrientes y el río Tigre. Estos ríos constituyen las principales cuencas hidrográficas del área de estudio y representan diferentes condiciones ambientales y patrones de contaminación que permiten una evaluación integral de la situación. Se recopilaron un total de 130 informes de evaluación ambiental emitidos por el OEFA, los cuales abordan la contaminación en suelos, aguas superficiales y sedimentos. De estos informes, se seleccionaron solo aquellos que trataban sobre la contaminación del suelo dentro de los límites territoriales del Lote 192. Además, para garantizar la relevancia de los datos, se consideraron únicamente los puntos de muestreo más cercanos a las coordenadas geográficas reportadas. Esta selección permitió enfocarse en los datos más pertinentes para el análisis de la contaminación del suelo en la región.

Una vez recopilados los informes, se procedió a graficar los puntos de muestreo de los tres ríos seleccionados. Para el río Pastaza se obtuvieron 10 informes, para el río

Corrientes 3 informes, y para el río Tigre 9 informes. Esta distribución proporcionó una visión detallada de las zonas más afectadas por la contaminación en cada uno de los ríos, lo que facilitó el análisis comparativo entre las diferentes áreas. Se extrajeron los datos correspondientes a las fracciones de hidrocarburos totales de petróleo, así como los valores de hidrocarburos aromáticos y metales pesados de los informes seleccionados. Estos valores fueron comparados con los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental de Perú para determinar si los niveles de contaminación superaban los límites permitidos. Posteriormente, se organizaron los datos en tablas y gráficos, lo que permitió visualizar de manera clara y precisa las áreas más contaminadas y el grado de afectación de los suelos.

Criterios para la selección de la técnica de remediación más adecuada

Además de examinar los informes de la OEFA, se llevó a cabo una investigación sobre los métodos de biorremediación empleados en la selva peruana-ecuatoriana o en suelos con condiciones geográficas similares. Se revisaron cuatro tesis académicas que trataban este tema, comparando sus resultados con los datos obtenidos en los informes de la OEFA. A partir de este análisis, se seleccionó el método de biorremediación que mejor se adaptaba a

las condiciones del Lote 192, con el objetivo de proponer una solución eficaz para mitigar los efectos de la contaminación por hidrocarburos en la región. Los criterios de selección incluyeron la eficiencia en la remoción de hidrocarburos, medida como el porcentaje de reducción de las concentraciones de TPH en el suelo tratado; el tiempo requerido para alcanzar niveles aceptables de remoción; la viabilidad económica y técnica de la implementación en el contexto amazónico; y la sostenibilidad ambiental del método, considerando sus impactos secundarios sobre el suelo y los ecosistemas.

La primera técnica evaluada fue la biorremediación utilizando el hongo *Pleurotus ostreatus*, que ha demostrado una alta eficiencia en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados. Los estudios revisados reportaron porcentajes de remoción de TPH superiores al 95% en un período de siete a ocho semanas, tanto en suelos esterilizados como no esterilizados. La segunda técnica evaluada fue la biorremediación mediante atenuación natural y compost, que combina la estimulación de la actividad microbiana nativa con la adición de compost como bioestimulante. Los resultados de estos estudios mostraron una eficiencia de remoción de hasta el 99.09% en un período de 60 días, con mejoras significativas en las propiedades físicoquímicas del suelo tratado. La tercera técnica evaluada fue la biorremediación con lodos activados, que uti-

liza microorganismos presentes en los lodos residuales de plantas de tratamiento para degradar los hidrocarburos. Los estudios revisados reportaron porcentajes de remoción de entre el 32% y el 46% para la fracción F2, y entre el 40% y el 50% para la fracción F3, en un período de 90 días. La cuarta técnica evaluada fue la biorremediación mediada por *Pseudomonas* spp., que utiliza cepas bacterianas específicas para degradar los hidrocarburos en biorreactores controlados.

La comparación de estas técnicas permitió identificar sus ventajas y limitaciones relativas en el contexto específico del Lote 192. La biorremediación con lodos activados destacó por su capacidad para degradar las fracciones más pesadas de hidrocarburos (F2 y F3), que son las predominantes en las cuencas del Pastaza y el Corrientes, así como por su menor tiempo de tratamiento en comparación con otras alternativas. La biorremediación mediante atenuación natural y compost mostró una mayor eficiencia en la degradación de la fracción F1, que es menos persistente pero también menos tóxica. La biorremediación con *Pleurotus ostreatus* y con *Pseudomonas* spp. ofrecieron resultados prometedores, pero requieren condiciones más controladas que pueden ser difíciles de mantener en el campo. La selección final de la técnica más adecuada consideró la combinación de estos factores y las características específicas de la contaminación en el Lote 192, así como la disponibilidad de recursos y la viabilidad de implementación en el contexto amazónico.

Capítulo 4

*Análisis de los resultados y discusión de los hallazgos
ambientales en el Lote 192*

Contaminación de suelo en la cuenca del Río Pastaza

Tabla 2. Concentración de contaminantes en el suelo del Río Pastaza

Fecha	Sitio	F1 mg/kg PS	F2 mg/kg PS	F3 mg/kg PS	Etilben- ceno mg/ kg PS	Tolueno mg/kg PS
29/10/2019	S0204	-	4038.24	3781.28	-	-
22/12/2020	S0447	-	636.88	485.31	-	0.19
30/12/2020	S0385	28.0	4770.08	902.17	0.81	0.82
30/12/2020	S0442	-	-	-	-	-
29/01/2021	S0173	0.3	173.00	130.00	0.01	-
26/02/2021	S0448	-	993.19	842.30	-	-
26/02/2021	S0388	0.3	42.33	338.50	0.01	0.01
30/03/2023	S0508	0.3	28.71	13.29	0.01	0.01
29/08/2023	S0538	0.3	5.00	5.00	0.01	0.01
29/08/2023	S0540	0.3	91.83	252.67	0.01	0.01
ECA Suelo Agrícola		200	1200	3000	0.082	0.37
ECA Suelo Industrial		500	5000	6000	0.082	0.37

Fecha	Sitio	Bario mg/kg PS	Cadmio mg/kg PS	Plomo mg/kg PS	Cromo VI mg/kg PS	Mercurio mg/kg PS
29/10/2019	S0204	-	-	-	-	-
22/12/2020	S0447	405.99	-	-	0.28	-
30/12/2020	S0385	5453.49	0.9966	127.41	-	-
30/12/2020	S0442	2451.82	-	62.36	14.48	-
29/01/2021	S0173	76.90	0.0391	11.86	0.10	0.02
26/02/2021	S0448	1900.63	0.3637	32.71	-	-

Fecha	Sitio	Bario mg/kg PS	Cadmio mg/kg PS	Plomo mg/kg PS	Cromo VI mg/kg PS	Mercurio mg/kg PS
26/02/2021	S0388	131.85	0.0789	10.29	0.12	0.10
30/03/2023	S0508	30.49	0.0008	9.20	0.10	0.23
29/08/2023	S0538	8.36	0.1384	7.36	0.42	0.11
29/08/2023	S0540	349.58	0.2842	16.82	0.77	0.06
ECA Suelo Agrícola		750	1.4	70	0.4	6.6
ECA Suelo Industrial		2000	22	800	1.40	24

Nota: informes Evaluación Ambiental (OEFA).

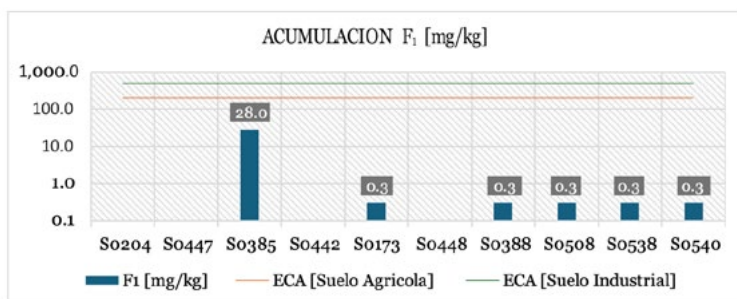
Los resultados evidencian la presencia de contaminantes en diez puntos de muestreo, con concentraciones que en algunos casos superan los estándares de calidad ambiental, especialmente para suelos agrícolas. Entre los parámetros analizados se encuentran hidrocarburos fraccionados (F1, F2 y F3), compuestos aromáticos como naftaleno, etilbenceno y tolueno, así como metales pesados como bario, cadmio, plomo, cromo VI y mercurio.

En cuanto a los hidrocarburos fraccionados, se observa que el sitio S0385 presenta la mayor concentración de F2 (4770.08 mg/kg PS) y un valor significativo de F3 (902.17 mg/kg PS), aunque estos valores se mantienen dentro del límite para suelos industriales superan los establecidos para suelos agrícolas. Otros sitios como S0447 y S0448 también presentan concentraciones elevadas de F2 y F3, indicando contaminación por hidrocarburos pesados.

Los valores de metales pesados varían considerablemente entre los sitios y fechas. Destaca el sitio So385 con una alta concentración de bario (5453.49 mg/kg PS) y plomo (127.41 mg/kg PS), superando los límites permisibles tanto para suelos agrícolas como industriales. El cadmio también muestra valores elevados en algunos puntos, como en So385 y So448, con concentraciones de 0.9966 mg/kg PS y 0.3637 mg/kg PS, respectivamente, superando el umbral para suelos agrícolas (0.8 mg/kg PS). Por otro lado, el cromo VI y el mercurio presentan valores menores, aunque algunos sitios, como So385 y So448, muestran niveles cercanos a los límites permitidos.

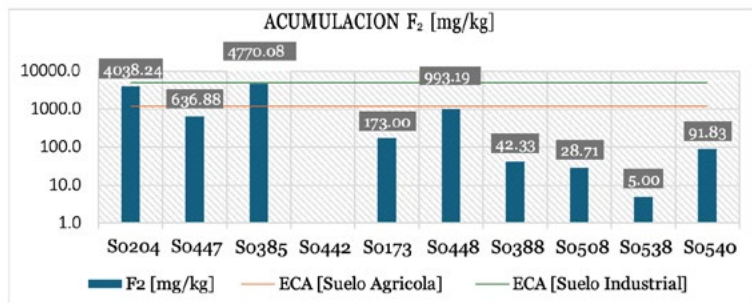
Los compuestos aromáticos analizados, como el naftaleno, etilbenceno y tolueno, presentan valores relativamente bajos en la mayoría de los sitios, con algunas excepciones. Por ejemplo, el sitio So385 el 30/12/2020 muestra una concentración de naftaleno de 1.138 mg/kg PS y etilbenceno de 0.81 mg/kg PS, valores que no superan los límites establecidos para suelos industriales, pero sí podrían ser relevantes en el contexto de suelos agrícolas.

Figura 7. Acumulación de F1 en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



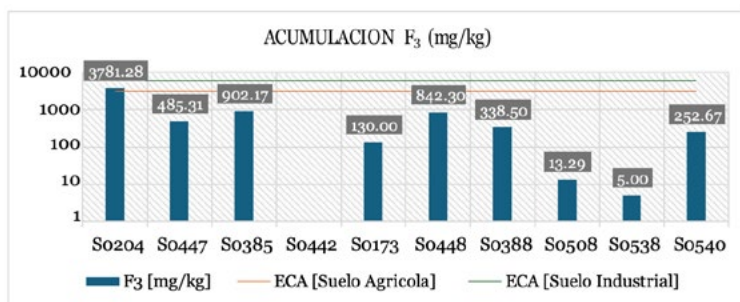
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 8. Acumulación de F2 en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



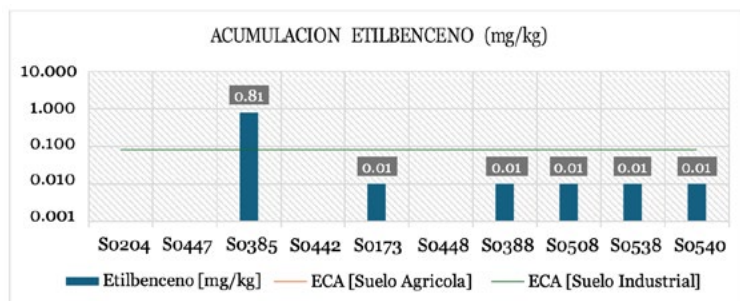
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 9. Acumulación de F₃ en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



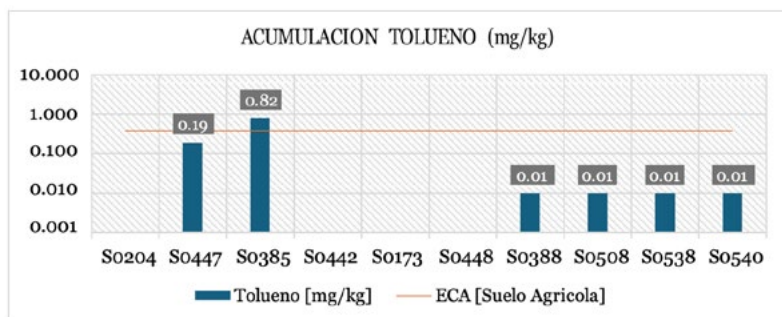
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 10. Acumulación Etilbenceno en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



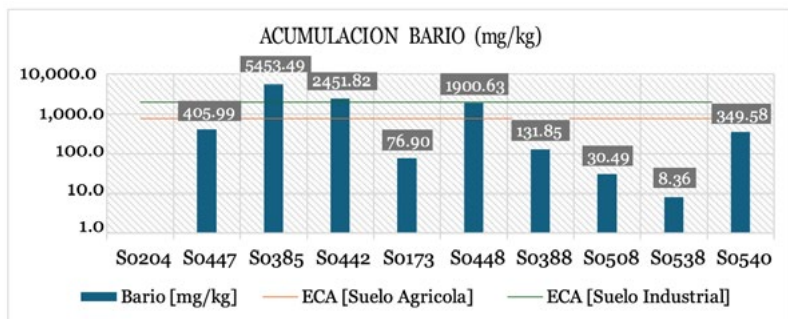
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 11. Acumulación de Tolueno en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



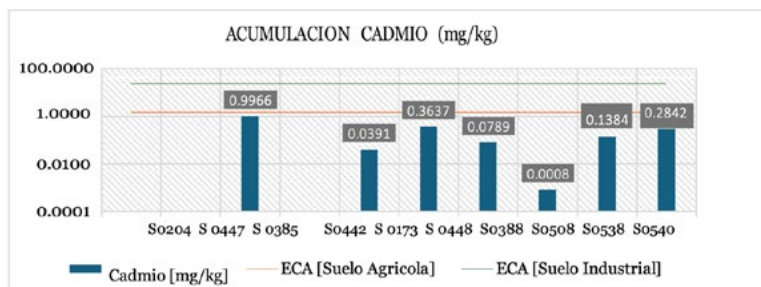
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 12. Acumulación de Bario en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



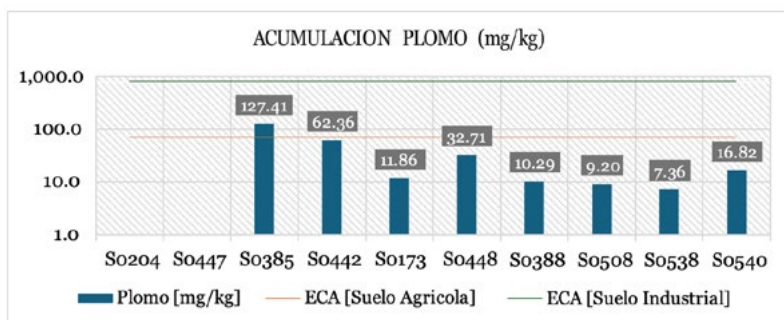
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 13. Acumulación de Cadmio en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



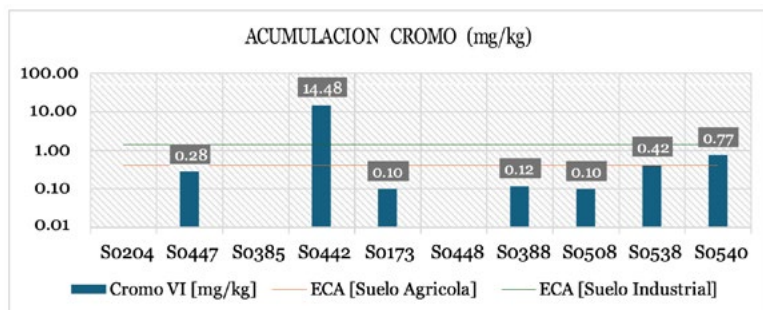
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 14. Acumulación de Plomo en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



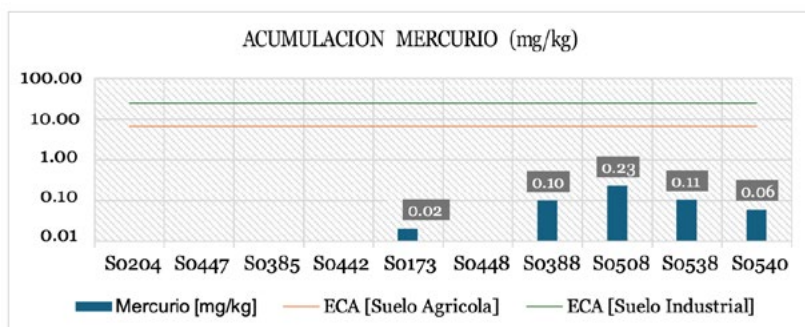
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 15. Acumulación de Cromo en 10 puntos de muestreo de la cuenca del Río Pastaza



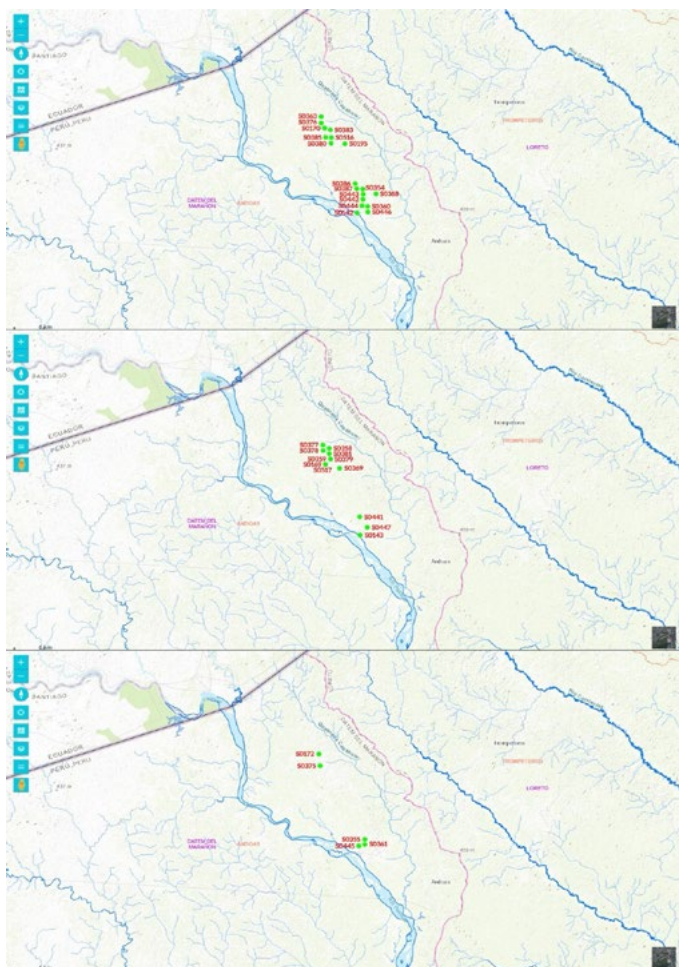
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 16. Acumulación de Mercurio en 10 puntos de muestreo del Río Pastaza



Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 17. Puntos de muestreo en la cuenca del Río Pastaza



Nota: elaborado con Informes de Evaluación Ambiental emitidos por OEFA

Contaminación de suelo del Río Corrientes

Tabla 3. Concentración de contaminantes en el suelo del Río Corrientes

Fecha	Sitio	F1 mg/kg PS	F2 mg/kg PS	F3 mg/kg PS	Bario mg/ kg PS
27/07/2021	S0407	-	1733.45	2082.64	1522.78
27/07/2021	S0406	-	577.91	-	188.43
21/08/2021	S0416	0.3	242.11	398.22	471.43
ECA Suelo Agrícola		200	1200	3000	750
ECA Suelo Industrial		500	5000	6000	2000

Fecha	Sitio	Cadmio mg/kg PS	Plomo mg/kg PS	Cromo VI mg/kg PS	Mercurio mg/ kg PS
27/07/2021	S0407	0.4353	36.71	1.34	-
27/07/2021	S0406	-	-	0.17	-
21/08/2021	S0416	0.1405	14.92	0.10	0.04
ECA Suelo Agrícola		1.4	70	0.4	6.6
ECA Suelo Industrial		22	800	1.40	24

Nota: informes Evaluación Ambiental (OEFA)

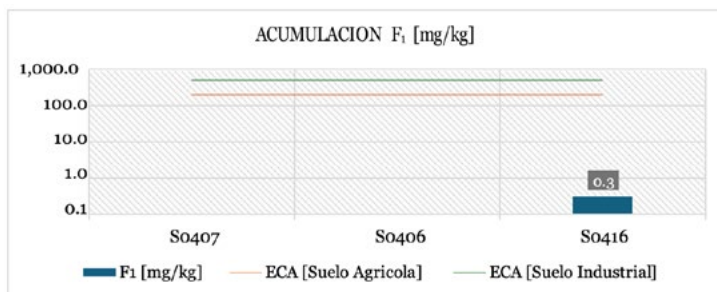
Los resultados reflejan la presencia de contaminantes en tres puntos de muestreo, con concentraciones que en algunos casos superan los estándares de calidad ambiental, especialmente para suelos agrícolas. Entre los parámetros analizados se encuentran hidrocarburos fraccionados (F1, F2 y F3) y metales pesados como bario, cadmio, plomo, cromo VI y mercurio.

En el punto de muestreo SO407, se observó una concentración de F2 y F3 de 1733.45 mg/kg PS y 2082.64 mg/kg PS respectivamente, superando el límite agrícola pero dentro del umbral industrial. En cuanto a los metales pesados, el bario registró 1522.78 mg/kg PS, además se detectó cadmio (0.4353 mg/kg PS), plomo (36.71 mg/kg PS) y cromo VI (1.34 mg/kg PS), manteniéndose dentro de los valores establecidos para suelo agrícola e industrial.

En el punto de muestreo SO406, se detectó una concentración de F2 de 577.91 mg/kg PS, dentro del límite agrícola. En términos de metales pesados, el bario alcanzó 188.43 mg/kg PS, muy por debajo de los límites permisibles. Asimismo, se registró cromo VI con un valor de 0.17 mg/kg PS, también dentro de los estándares establecidos.

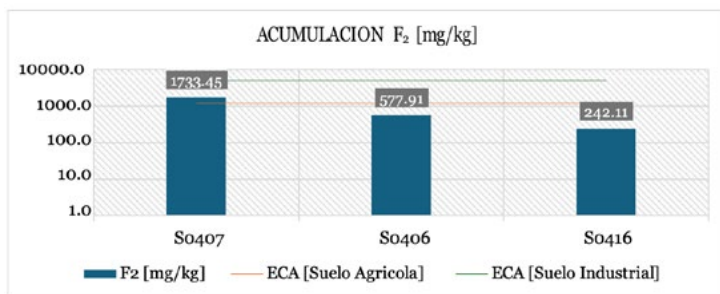
Por otro lado, en el punto de muestreo SO416, se observó una concentración de F1 de 0.3 mg/kg PS, de F2 de 242.11 mg/kg PS y de F3 de 398.22 mg/kg PS, todas dentro de los límites agrícolas e industriales. En cuanto a los metales pesados, el bario registró 471.43 mg/kg PS, superando el estándar agrícola pero dentro del industrial. El cadmio alcanzó 0.1405 mg/kg PS, por debajo de los límites permisibles. El plomo presentó un valor de 14.92 mg/kg PS, por debajo del umbral permitido en suelos agrícolas. Por último, se detectó cromo VI (0.10 mg/kg PS) y mercurio (0.04 mg/kg PS), ambos dentro de los valores permitidos.

Figura 18. Acumulación de F1 en 3 puntos de muestreo del Rio Corrientes



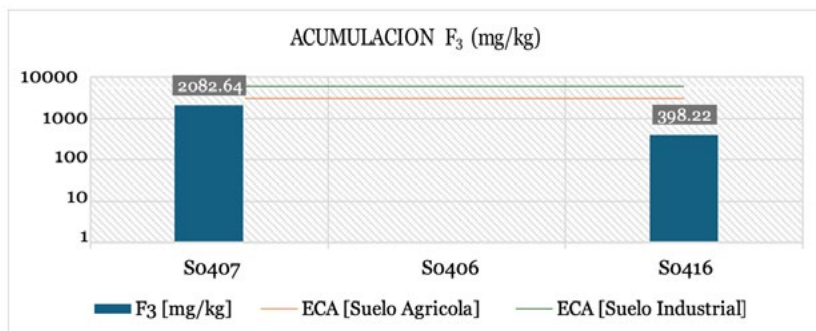
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 19. Acumulación de F2 en 3 puntos de muestreo del Rio Corrientes



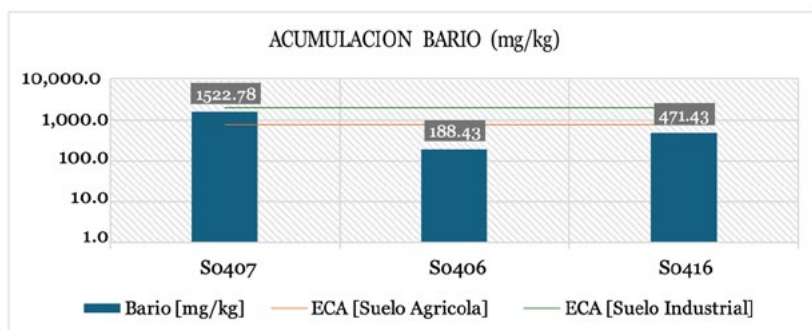
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 20. Acumulación de F₃ en 3 puntos de muestreo del Río Corrientes



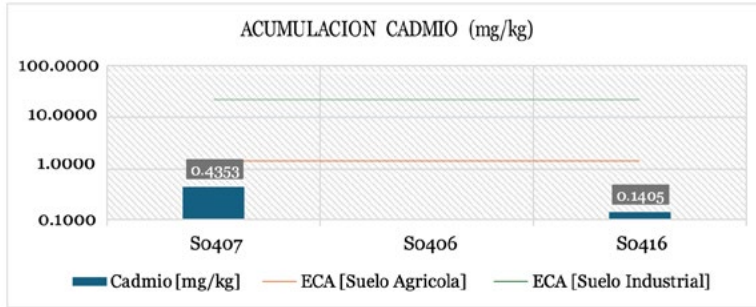
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 21. Acumulación de Bario en 3 puntos de muestreo del Río Corrientes



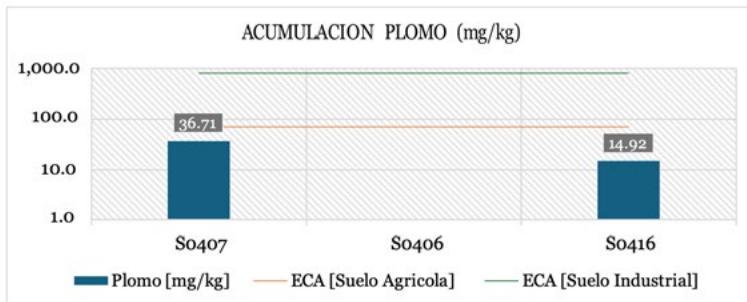
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 22. Acumulación de Cadmio en 3 puntos de muestreo del Rio Corrientes



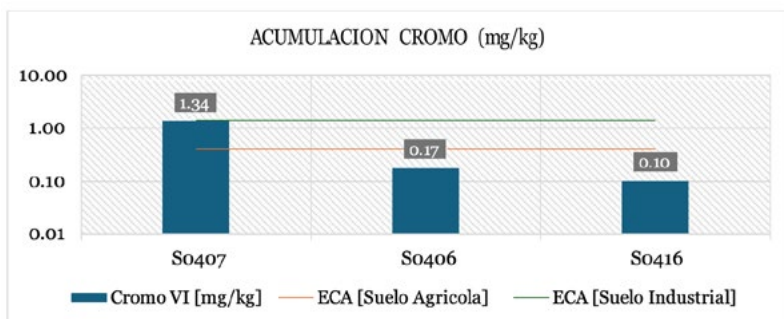
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 23. Acumulación de Plomo en 3 puntos de muestreo del Rio Corrientes



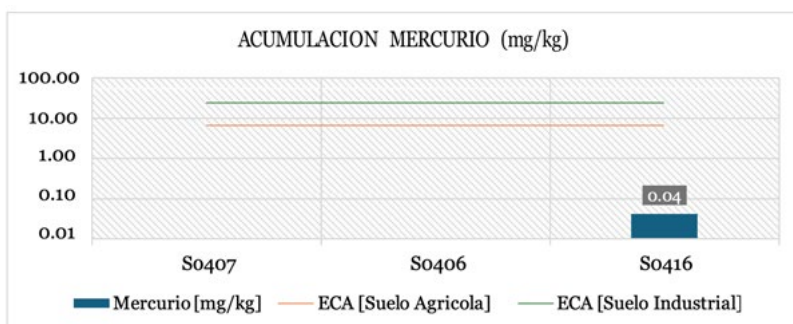
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 24. Acumulación de Cromo en 3 puntos de muestreo del Río Corrientes



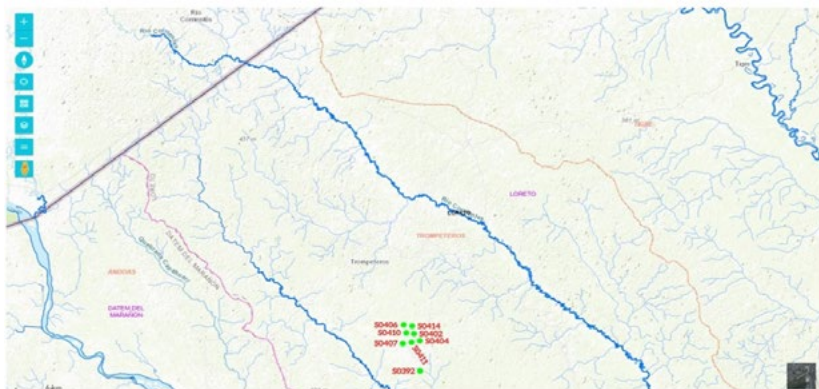
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 25. Acumulación de Mercurio en 3 puntos de muestreo del Río Corrientes



Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 26. Puntos de muestreo de la cuenca del Río Corrientes



Nota: elaborado con Información de Informes de Evaluación Ambiental emitidos por OEFA

Contaminación del suelo del Río Tigre

Tabla 4. Concentración de contaminantes en el suelo del Río Tigre

Fecha	Sitio	F1 mg/kg PS	F2 mg/kg PS	F3 mg/kg PS	Bario mg/ kg PS
31/12/2019	S0228	-	7393.29	11556.64	66.13
31/12/2019	S0220-4	-	133.71	445.33	112.22
30/10/2019	S0236	-	-	3617.85	-
30/04/2020	S0288	-	10916.30	20162.35	-
30/04/2020	S0203	-	2010.21	2889.14	-
31/03/2021	S0473	-	375.00	-	-
27/02/2022	S0491	0.3	11.00	18.00	19.69
29/04/2022	S0463	62.0	415.09	337.00	29.46

Fecha	Sitio	F1 mg/kg PS	F2 mg/kg PS	F3 mg/kg PS	Bario mg/ kg PS
28/02/2022	S0466	-	516.00	-	-
ECA Suelo Agrícola		200	1200	3000	750
ECA Suelo Industrial		500	5000	6000	2000

Fecha	Sitio	Cadmio mg/kg PS	Plomo mg/kg PS	Cromo VI mg/kg PS	Mercurio mg/kg PS	Arsénico mg/kg PS
31/12/2019	S0228	0.5000	-	0.17	-	5.83
31/12/2019	S0220-4	1.3105	-	0.31	-	25.05
30/10/2019	S0236	-	-	-	-	-
30/04/2020	S0288	-	-	-	-	-
30/04/2020	S0203	-	-	0.20	-	-
31/03/2021	S0473	-	-	0.21	-	-
27/02/2022	S0491	0.0008	9.37	0.10	0.09	1.94
29/04/2022	S0463	0.0105	10.61	0.14	0.06	2.23
28/02/2022	S0466	-	-	0.25	-	-
ECA Suelo Agrícola		1.4	70	0.4	6.6	50
ECA Suelo Industrial		22	800	1.40	24	140

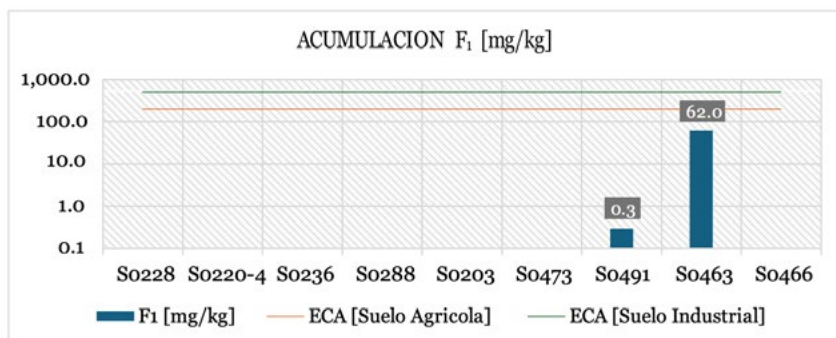
Nota: informes Evaluación Ambiental (OEFA)

En los resultados se evidencian concentraciones de contaminantes en nueve puntos de muestreo. Los parámetros analizados incluyen fracciones de hidrocarburos totales de petróleo (F1, F2 y F3), metales pesados como bario, cadmio, plomo, cromo VI, mercurio y arsénico.

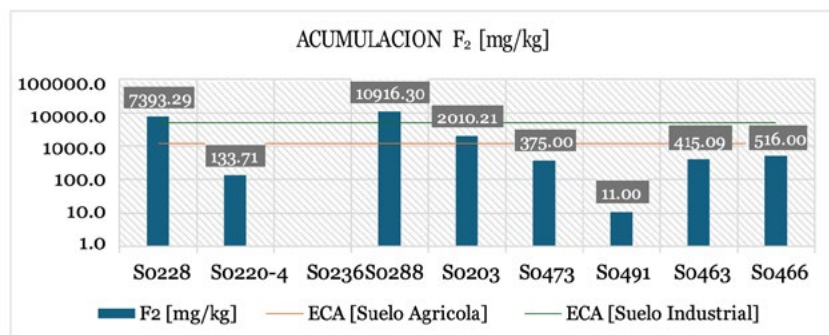
En cuanto a los hidrocarburos, la fracción F2 presenta valores elevados en múltiples puntos de muestreo, destacando So228 (7393.29 mg/kg PS) y So288 (10916.30 mg/kg PS), ambos significativamente superiores a los límites establecidos para suelos agrícolas e industriales. De manera similar, la fracción F3 muestra concentraciones alarmantes, como en So228 (11556.64 mg/kg PS) y So288 (20162.35 mg/kg PS), excediendo los límites permitidos incluso para suelos industriales.

Respecto a los metales pesados, el barrio registra un valor elevado en So228 (66.13 mg/kg PS) y So220-4 (112.22 mg/kg PS), aunque dentro de los límites industriales (2000 mg/kg PS). Sin embargo, el cadmio en So220-4 (1.3105 mg/kg PS) supera el límite agrícola (1.4 mg/kg PS) pero se mantiene por debajo del industrial (22 mg/kg PS). El plomo, en sitios como So491 y So463, muestra niveles de 9.37 mg/kg PS y 10.61 mg/kg PS respectivamente, por debajo de los estándares tanto agrícolas como industriales.

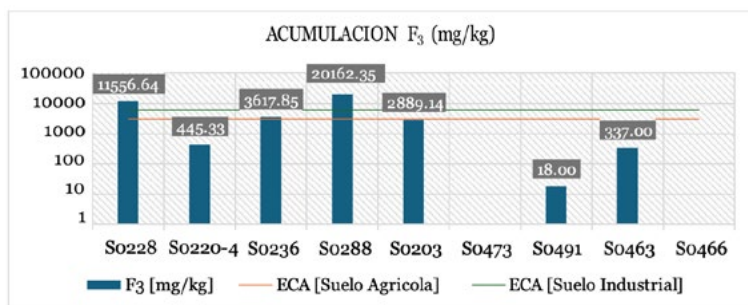
En lo que respecta al cromo VI, se registran valores como 0.17 mg/kg PS en So228 y 0.31 mg/kg PS en So220-4, todos dentro de los límites aceptables para ambos tipos de suelo. El mercurio y el arsénico presentan valores preocupantes en algunos casos, como en So220-4, donde el arsénico alcanza 25.05 mg/kg PS, superando el umbral agrícola (50 mg/kg PS) pero por debajo del industrial (140 mg/kg PS).

Figura 28. Acumulación de F₁ en 9 puntos de muestreo del Río Tigré

Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

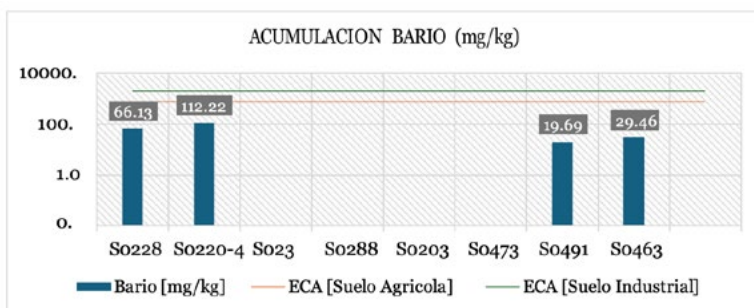
Figura 29. Acumulación de F₂ en 9 puntos de muestreo del Río Tigré

Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 30. Acumulación de F₃ en 9 puntos de muestreo del Río Tigré

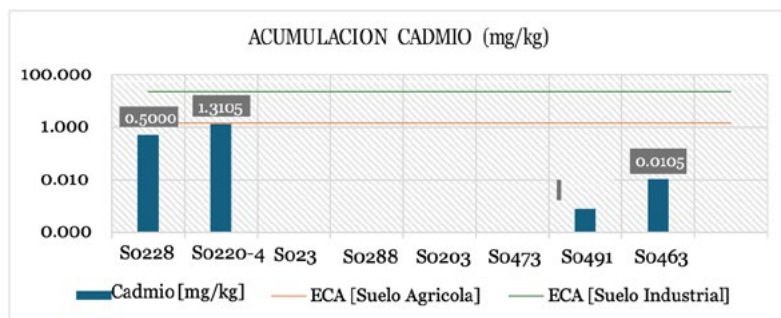
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 31. Acumulación de Bario en 9 puntos de muestreo del Río Tigré



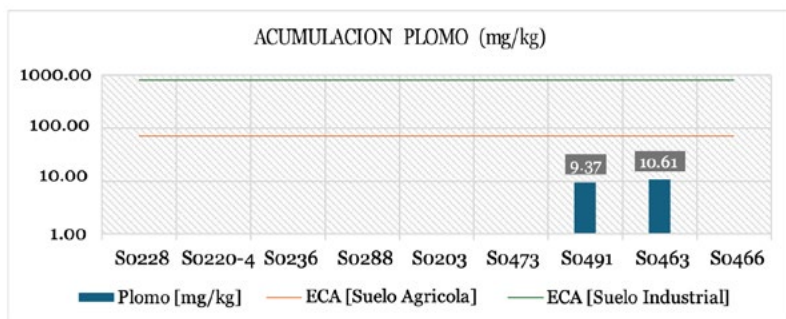
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 32. Acumulación de Cadmio en 9 puntos de muestreo del Rio Tigre



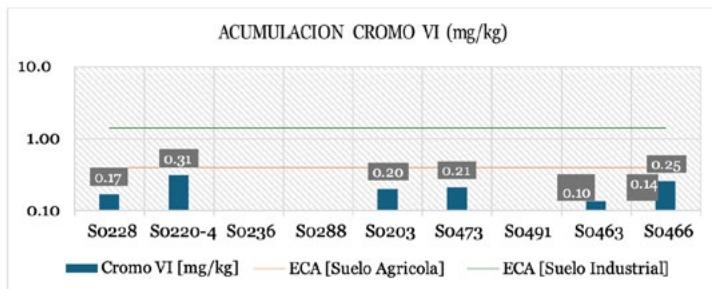
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 33. Acumulación de Plomo en 9 puntos de muestreo del Rio Tigre



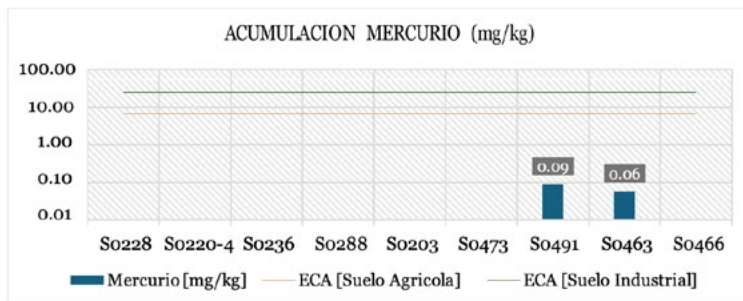
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 34. Acumulación de Cromo VI en 9 puntos de muestreo del Río Tigre



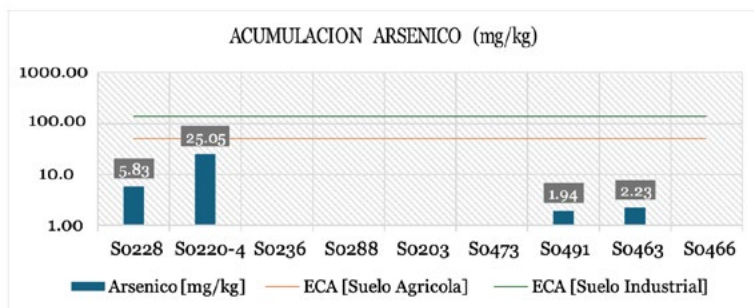
Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 35. Acumulación de Mercurio en 9 puntos de muestreo del Río Tigre



Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 36. Acumulación de Arsénico en 9 puntos de muestreo del Río Tigre



Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental (OEFA)

Figura 37. Puntos de muestreo de la cuenca del Río Tigre



Nota: elaborado con información de Informes de Evaluación Ambiental emitidos por OEFA

Eficiencia de Métodos de Biorremediación

Biorremediación utilizando el Hongo *Pleurotus Ostreatus*

El estudio realizado en el campamento Sacha 161, ubicado en la Amazonía ecuatoriana, se determinó que el hongo *Pleurotus ostreatus* es un eficaz degradador de hidrocarburos en suelos esterilizados, logrando una reducción de hasta el 97% por sí solo. Además, cuando interactúa con la flora bacteriana nativa presente en bajas concentraciones, se alcanza un nivel de degradación similar, pero en un menor tiempo. Estos resultados destacan su importancia en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo, ya que ofrece la ventaja de no requerir tratamientos químicos o mecánicos complejos (Deley, 2010).

Tabla 5. Porcentaje de Eficiencia en la Biorremediación en Suelos esterilizados y no esterilizados.

SUELO ESTERILIZADO		SUELO NO ESTERILIZADO	
Unidades	% Eficiencia	Unidades	% Eficiencia
B	95.53	B	50.36
C1	94.46	C1	95.20
C2	95.18	C2	95.32
C3	96.88	C3	96.66
C4	97.45	C4	96.70

Nota: biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo del campamento Sacha 161 utilizando el Hongo *Pleurotus Ostreatus*.

Para las unidades experimentales C3 y C4 que pasen el valor máximo permisible para suelos de uso industrial se logra una remoción en un lapso de ocho semanas del 96.9% y 97.4% respectivamente. Asimismo, las unidades experimentales en suelos no esterilizados, C3 y C4, obtuvieron los mejores resultados, logrando reducir los TPH a niveles inferiores a los valores máximos permitidos para suelos de uso agrícola. En un período de siete semanas, alcanzaron una remoción del 96.6% y 96.7%, respectivamente (Deley, 2010).

Finalmente, no se observó una diferencia significativa en la remoción de TPH entre ambos métodos, tanto en suelos esterilizados como no esterilizados. Sin embargo, considerando factores como el tiempo, los costos y la logística, para una biorremediación ex-situ resulta más conveniente trabajar con suelos no esterilizados (Deley, 2010).

Biorremediación mediante Atenuación Natural y Compost

Según Fernández Valqui y Pariente Mondragón (2020), en su estudio realizado en con muestras de suelo extraídas en el Km 397 + 300 Tramo II del Oleoducto Norperuano utilizando técnicas experimentales del Laboratorio de Investigación de Agua y Suelo de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM) se evaluó la eficiencia de la biorremediación de hidrocarbu-

ros totales de petróleo (HTP) mediante la técnica de atenuación natural y la adición de compost como bioestimulante. El estudio consistió en un experimento controlado en el que se prepararon 14 cajones de madera con un volumen de 0.50 m³ cada uno, los cuales fueron llenados con 2.732 kg de suelo contaminado por hidrocarburos solicitados a la refinería El Milagro en la Provincia de Utcubamba. El suelo utilizado contenía una concentración inicial de HTP de 66,580 mg/kg, valor que supera ampliamente el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para suelos agrícolas (200 mg/kg).

Para evaluar la eficiencia de la degradación de los hidrocarburos, se establecieron dos tratamientos principales con siete repeticiones cada uno:

- Tratamiento 1 (C1:1-7): Suelo contaminado con HTP + agua (control)
- Tratamiento 2 (C2:8-14): Suelo contaminado con HTP + agua + compost (bioestimulación)

Ambos tratamientos se mantuvieron bajo condiciones ambientales controladas, con una humedad constante del 15%, lograda mediante riego periódico con agua destilada para evitar la alteración de las condiciones del suelo. La bioestimulación en C2 se realizó con la adición de compost, siguiendo la relación estequiométrica 100:10:1

(C:N:K), necesaria para la actividad microbiana óptima en procesos de biodegradación.

La caracterización del suelo se llevó a cabo mediante el análisis de la muestra extraída inicialmente, tras su contaminación y posteriormente, luego del proceso experimental en los cajones. Cada unidad experimental fue sometida a muestreos en dos periodos:

1. Día 0: caracterización inicial del suelo contaminado.
2. Día 60: evaluación de la evolución de la biodegradación.

Los análisis incluyeron:

- Determinación de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) mediante cromatografía de gases, según la metodología EPA 8015.
- Análisis fisicoquímico del suelo: pH, conductividad eléctrica, contenido de carbono orgánico, nitrógeno total y capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- Cuenta bacteriana: Determinación de unidades formadoras de colonias (UFC) mediante la técnica de cuenta en placa con diluciones seriadas.

Tabla 6. Eficiencia de Remoción de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP)

Tiempo (días)	Tratamiento	Concentración inicial de HTP (mg/kg)	Concentración final de HTP (mg/kg)	% remoción
0	Suelo con agua	66,580	<0.603	99.09%
60	Suelo con compost	66,580	<0.603	99.09%

Nota: Fernández Valqui y Pariente Mondragón (2020).

Se realizó un análisis comparativo de los parámetros fisicoquímicos del suelo antes y después del tratamiento.

Tabla 7. Parámetros Fisicoquímicos y Mecánicos del Suelo Antes y Después del Tratamiento

Parámetro	Inicial (Suelo Contaminado)	Final (C1: Solo Agua)	Final (C2: Agua + Compost)
pH	5.38	5.35	6.98
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0.05	0.09	0.8
Fósforo (P)(ppm)	4.18	7.74	21.3
Potasio (K)(ppm)	183.92	132.05	1037.88
Carbono Orgánico (%)	3.64	2.22	5.6
Nitrógeno Total (%)	0.31	0.19	0.48
Análisis Mecánico	-	-	-

Parámetro	Inicial (Suelo Con- taminado)	Final (C1: Solo Agua)	Final (C2: Agua + Compost)
Arena (%)	60	88	84
Limo (%)	14	6	8
Arcilla (%)	26	6	8
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)(mg/100g)	25.6	11.2	29.6
Cationes Cambiables (mg/100g)	-	-	-
Calcio (Ca ²⁺)	16.53	6.28	20.86
Magnesio (Mg ²⁺)	3.14	1.44	4
Potasio (K ⁺)	0.36	0.16	2.52
Sodio (Na ⁺)	0.18	0.14	0.59
Aluminio (Al ³⁺) + Hidrógeno (H ⁺)	0.16	0.09	0

Nota: Fernández Valqui y Pariente Mondragón (2020).

Se observa que en el tratamiento con compost se produjo un incremento significativo en el contenido de fósforo, potasio y nitrógeno, lo cual favoreció la actividad microbiana y la degradación de los hidrocarburos.

Evolución de la Población Microbiana: La cuantificación de unidades formadoras de colonias (UFC/g) en el suelo se llevó a cabo al inicio del estudio y nuevamente tras 60 días de experimentación. El propósito de esta evaluación fue establecer una relación entre la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y la presencia de microorganismos en el suelo.

Para minimizar cualquier alteración en las muestras durante la aplicación de la técnica de cuenta en placa, se emplearon dos enfoques de enriquecimiento: con agar nutritivo y con agua destilada. Los resultados iniciales indicaron que la mayor cantidad de colonias bacterianas se obtuvo con el agar nutritivo, alcanzando 28 UFC/g.

En el segundo muestreo, realizado tras 60 días de tratamiento, los valores de UFC fueron registrados y analizados. Se utilizaron dos diluciones seriadas para determinar la densidad microbiana en el suelo. En la primera dilución, realizada antes de la contaminación con HTP, las UFC variaban entre 28 y 250 UFC/g. En el segundo análisis, llevado a cabo al término del experimento, se detectó una reducción en la población bacteriana, con un conteo promedio de 18 UFC/g.

La disminución en la actividad microbiana sugiere una reducción en la respiración bacteriana, sin que esto afectara significativamente la eficiencia del proceso de remoción de hidrocarburos. Dado que las concentraciones finales de HTP se redujeron a <0.6 mg/kg y la eficiencia de degradación alcanzó el 99.09%, se determinó que un análisis estadístico más detallado no era necesario. Inicialmente, se contempló la aplicación de un diseño completamente aleatorizado (DCA) y un análisis de varianza (prueba F), pero al observar que las concentraciones finales eran prácticamente iguales en todos los casos, dicho análisis no aportaría información adicional relevante.

La eficiencia de remoción en cada cajón fue determinada mediante el cálculo correspondiente (Corona, 2004). Los resultados muestran que la reducción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) alcanzó un 99.09%, evidenciando una disminución significativa en todas las unidades experimentales, con algunos cajones logrando una remoción del 100%. En general, las concentraciones iniciales de HTP, que eran de 66.6 mg/kg, se redujeron en más del 95%, lo que indica una alta eficacia del tratamiento aplicado.

Según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos establecidos por el MINAM (2017), este experimento es aplicable a distintos tipos de suelo, incluyendo agrícola, residencial y comercial. En el caso específico del suelo agrícola, el límite máximo permitido para hidrocarburos de fracción ligera (F1) es de 200 mg/kg, y los resultados obtenidos están por debajo de este umbral, confirmando la efectividad del proceso.

Estudios previos han reportado niveles de remoción superiores al 80% para hidrocarburos aromáticos policíclicos (Corona, 2004). En esta investigación, se identificó que los factores ambientales, particularmente la disponibilidad de agua, juegan un papel crucial en la degradación de los HTP y HAP, lo cual coincide con estudios previos (Liu et al., 2001). Se observó que un contenido de agua constante del 15% permitió obtener resultados óptimos de degradación.

En conclusión, el agua es un elemento clave en la remoción de hidrocarburos, aunque también puede influir en la actividad microbiana, la difusión del contaminante y la eficiencia de la biorremediación. La combinación de aireación adecuada, humedad controlada y actividad microbiana resultó ser determinante para la alta eficiencia de degradación de los HTP (Liu et al., 2001). Esto confirma que la gestión adecuada de los factores ambientales es fundamental para optimizar los procesos de biorremediación en suelos contaminados.

Biorremediación con Lodos Activados

Para este estudio se utilizó una muestra de suelo (60 kg), pertenecientes a la zona selva en San Martín, separado en 3 muestras equivalentes a las cuales se les hace una aplicación de % de lodo variable (20%, 30%, 40%). Se evaluó la carga microbiana y se identificaron los microorganismos GRAM presentes en el suelo nativo antes del inicio, durante el proceso y al finalizar el tratamiento, en un período de 90 días.

Tabla 8. Remoción de TPH F2 y F3 vs. Crecimiento microbiano.

Concentración lodo activado (w/w)	15 días			30 días		
	% remoción		C.N. de m.o.	% remoción		C.N. de m.o.
	TPH F2	TPH F3		TPH F2	TPH F3	
C1(20%)	8.8	-0.8	2.3	15.3	6.7	4.7
C2(30%)	20.5	18.5	4.8	28.9	21.0	5.1
C3(40%)	33.2	27.5	6.3	41.4	31.9	6.6

Concentración lodo activado (w/w)	60 días			90 días		
	% remoción		C.N. de m.o.	% remoción		C.N. de m.o.
	TPH F2	TPH F3		TPH F2	TPH F3	
C1(20%)	28.1	17.6	4.9	32.2	40.4	2.4
C2(30%)	31.0	25.9	5.1	39.3	45.1	4.1
C3(40%)	41.4	40.6	6.6	46.2	49.9	6.4

Nota: determinación de la eficiencia de biorremediación con Lodos Activados en suelo contaminado por hidrocarburos.

Se observa que, de acuerdo con la definición de eficiencia en biorremediación, las reducciones totales de TPH tras 90 días de tratamiento oscilan entre un 32% y un 46% para TPH F2, y entre un 40% y un 50% para TPH F3. En todas las unidades de análisis, se observó una relación directamente proporcional entre la cantidad de dosis aplicada, la concentración de microorganismos y la remoción de los hidrocarburos totales de petróleo a lo largo del tiempo.

Se observa que, en todas las unidades de análisis, la concentración de TPH sigue una relación directamente pro-

porcional entre la dosis de lodo activado aplicada y la remoción de los hidrocarburos totales de petróleo de cadena media y pesada a lo largo del tiempo.

La biorremediación de suelos contaminados con petróleo crudo a través de la aplicación de lodos activados resulta ser un proceso muy eficiente y sostenible. Este tratamiento logra eliminar hasta un 50% de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (F2 y F3) en solo 90 días, al mismo tiempo que mejora o restituye algunas propiedades organolépticas del suelo. Cabe resaltar que este tratamiento emplea un residuo como insumo principal, lo que evidencia una práctica de reutilización de residuos potencialmente peligrosos, como los lodos activados, y contribuye a la reducción de los costos de disposición de estos.

- Biorremediación mediada por *Pseudomonas* spp

El estudio se basó en suelos contaminados con hidrocarburos, los cuales fueron recolectados de la Empresa Petróleos de la Selva (anteriormente conocida como MAPLE GAS). Se obtuvieron aproximadamente 2 kg de muestras, que luego fueron homogeneizadas para extraer 100 gramos de sustrato, los cuales se distribuyeron en los biorreactores. Para cada concentración de biomasa microbiana, se emplearon tres biorreactores con sus respectivas tres repeticiones. Asimismo, se incluyeron tres biorreactores adicionales con sus tres repeticiones para la muestra con-

trol, aplicando diferentes dosis de *Pseudomonas* spp. de 20 mL, 40 mL y 80 mL (Chang, 2020).

Tabla 9. Promedio de porcentaje de degradación, según días de evaluación respecto a inóculos utilizados.

Días	Inóculos	% Degradación
7	0	2.7
7	20	3.44
7	40	4.55
7	80	9.44
14	0	4.22
14	20	9.47
14	40	9.97
14	80	11.19

Nota: biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburo mediada por *Pseudomonas* spp. en biorreactores.

El suelo contaminado analizado tenía una textura franco arcillo-arenosa, un pH de 6 y un nivel de humedad del 25%. Además, con el paso del tiempo, la cantidad de colonias de *Pseudomonas* spp. fue disminuyendo, especialmente en los tratamientos con mayor eficiencia en la degradación de hidrocarburos totales de petróleo. Esto sugiere que a medida que la concentración o biodisponibilidad de los hidrocarburos totales de petróleo disminuye, también se reduce la presencia de unidades formadoras de colonias de *Pseudomonas* spp (Chang, 2020).

En cuanto a la degradación de hidrocarburos, se observó que al día 7 los porcentajes de degradación fueron de 2.7 % para el testigo, 3.44 % para el tratamiento con 20 mL, 4.55 % con 40 mL y 9.44 % con 80 mL. Para el día 14, estos valores aumentaron a 4.22 %, 9.47 %, 9.97 % y 11.19 % respectivamente (Chang, 2020).

Tres cuencas, una misma herida: la persistencia de la contaminación por hidrocarburos y metales pesados en el Lote 192

Los resultados de esta investigación revelan una notable presencia de contaminantes en las tres cuencas del Lote 192, corroborando la hipótesis inicial: “El derrame de petróleo ha provocado un deterioro significativo en la calidad de los suelos del Lote 192”.

En la Cuenca del río Pastaza, las concentraciones elevadas de hidrocarburos fraccionados (F2 y F3) y metales pesados como bario y plomo en sitios como S0385 superan los límites establecidos para suelos agrícolas, evidenciando un grave deterioro ambiental. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos, como el de Ángeles Mendiola, que también documentaron altos niveles de contaminación por hidrocarburos en la región.

En la Cuenca del río Corrientes, aunque los valores de hidrocarburos se mantienen dentro de los límites indus-

triales en la mayoría de los sitios, se observan concentraciones preocupantes de metales pesados en puntos como So407, que superan los umbrales para suelos agrícolas. Este patrón sugiere que, aunque algunas áreas presentan menor contaminación, otras podrían verse afectadas a largo plazo por la presencia de metales peligrosos, lo que refuerza la necesidad de intervenciones más específicas.

La Cuenca del río Tigre muestra concentraciones alarmantes de hidrocarburos, especialmente en los sitios So228 y So288, con valores de F2 y F3 que exceden los límites industriales. Además, la presencia de arsénico y mercurio en algunos puntos es una preocupación añadida, ya que estos metales pesados pueden tener efectos tóxicos persistentes. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas, que subrayan la persistencia de la contaminación por hidrocarburos y metales pesados en la región.

Al comparar estos resultados con investigaciones anteriores, como las de Mendiola, se confirma que la contaminación en la región amazónica peruana es un problema generalizado, con alta concentración de hidrocarburos y metales pesados. Además, la variabilidad en la concentración de contaminantes según la cuenca y el punto de muestreo subraya la necesidad de realizar estudios más específicos para cada zona.

El papel de los lodos activados en la recuperación del Lote 192

Los antecedentes del Lote 192 muestran que el uso de lodos activados ha conseguido disminuir entre un 60-70% los hidrocarburos totales de petróleo (TPH), especialmente en suelos con alta humedad. Esta eficacia se debe a la actividad microbiana en los lodos, que facilita la degradación de hidrocarburos ligeros y medianamente pesados. Además, la combinación de lodos activados con procesos de oxidación química ha mejorado la degradación de compuestos más complejos, acelerando la recuperación del suelo.

La evidencia apoya fuertemente la hipótesis, ya que la biorremediación con lodos activados ha demostrado ser efectiva en la degradación de hidrocarburos de fracción F2 y, en algunos casos, de F3, especialmente cuando se combina con otros tratamientos como la oxidación química.

La biorremediación con lodos activados y los desafíos del Lote 192

Hipótesis: la tecnología de biorremediación con lodos activados es la más adecuada para el Lote 192.

El análisis de la contaminación en las cuencas de los ríos Pastaza, Corrientes y Tigre reveló la presencia de hidro-

carburos fraccionados (F2 y F3) en la mayoría de los puntos de muestreo, y metales pesados en concentraciones significativas en algunas zonas. Por lo tanto, la biorremediación con lodos activados podría ser una estrategia viable para recuperar estos suelos contaminados, ya que este proceso ha demostrado reducir hasta un 50% la presencia de hidrocarburos en 90 días. Dado que en todas las unidades de análisis se observó una relación directamente proporcional entre la cantidad de lodo activado aplicado y la remoción de hidrocarburos, este método sería particularmente efectivo en las cuencas del Pastaza y del Corrientes, donde las concentraciones de hidrocarburos están dentro de rangos tratables. Sin embargo, en el caso del río Tigre, donde los niveles de F2 y F3 superan ampliamente los estándares industriales, el tratamiento podría requerir una mayor dosis de lodo y un período prolongado de monitoreo para lograr una remediación eficiente.

Aunque la biorremediación con lodos activados es eficaz, es importante tener en cuenta que este método se centra en la degradación de hidrocarburos y no en la eliminación de metales pesados. Si bien podría mejorar la calidad del suelo al reducir contaminantes orgánicos, sería necesario complementar el proceso con otras técnicas. Por lo tanto, la implementación de esta estrategia debe ir acompañada de un monitoreo continuo para evaluar su efectividad y la necesidad de ajustes según las características específicas de cada cuenca.

Capítulo 5

*La dimensión territorial de la remediación ambiental en
el Lote 192*

BAJO LA SOMBRA DEL PETRÓLEO

Evaluación ambiental y estrategias de recuperación de suelos en la
Amazonía peruana

Las condiciones territoriales de la remediación en la Amazonía peruana

La Amazonía peruana constituye un territorio cuyas características físicas, biológicas y sociales imponen condiciones específicas a cualquier intervención de remediación ambiental. La lejanía de los sitios contaminados respecto a los centros urbanos y a las infraestructuras de transporte, la densa cobertura vegetal que dificulta el acceso a las áreas afectadas, la alta pluviosidad que puede arrastrar los contaminantes hacia los cuerpos de agua y las condiciones climáticas extremas que limitan las ventanas de tiempo disponibles para las actividades de campo, configuran un entorno que desafía las soluciones diseñadas en condiciones controladas de laboratorio o en contextos territoriales más accesibles. La literatura sobre remediación de suelos en regiones tropicales ha señalado consistentemente que las técnicas que funcionan eficientemente en climas templados pueden requerir adaptaciones significativas para operar en condiciones amazónicas, donde la humedad, la temperatura y la actividad microbiana siguen patrones diferentes a los de otras regiones. La experiencia acumulada en proyectos de remediación en la selva peruana y ecuatoriana sugiere que la consideración de estos factores desde las etapas iniciales de la planificación es una condición necesaria para evitar los retrasos, los sobrecostos y los fracasos que han caracterizado muchas iniciativas en la región.

La distribución de los sitios contaminados en el territorio del Lote 192 añade una capa adicional de complejidad a la planificación de las intervenciones. Los puntos de muestreo analizados en los capítulos precedentes se distribuyen a lo largo de las cuencas de los ríos Pastaza, Corrientes y Tigre, con concentraciones variables de contaminantes que reflejan tanto la intensidad de las actividades petroleras en cada sector como las características hidrogeológicas de los suelos. Algunos sitios, como los identificados en la cuenca del río Tigre, presentan concentraciones de hidrocarburos de fracción media y pesada que superan ampliamente los estándares industriales, lo que sugiere la necesidad de intervenciones intensivas y prolongadas. Otros sitios, en cambio, presentan niveles de contaminación que podrían ser abordados mediante técnicas menos intensivas en recursos y tiempo. La priorización de las intervenciones debe considerar no solo la severidad de la contaminación, sino también la accesibilidad de los sitios, la proximidad a comunidades humanas y la sensibilidad de los ecosistemas afectados, de manera que los recursos disponibles se orienten hacia las áreas donde puedan generar los mayores beneficios ambientales y sociales.

La estacionalidad de las condiciones climáticas constituye un factor determinante para la planificación de las actividades de remediación en la Amazonía. La temporada de lluvias, que se extiende aproximadamente de noviembre a abril, puede dificultar el acceso a los sitios, inundar las

áreas de trabajo y arrastrar los contaminantes hacia los cursos de agua, complicando las labores de contención y tratamiento. La temporada seca, por su parte, ofrece condiciones más favorables para el acceso y la operación de equipos, pero puede limitar la disponibilidad de agua necesaria para algunos procesos de biorremediación. La planificación de las intervenciones debe considerar estas restricciones estacionales y prever los recursos necesarios para aprovechar al máximo las ventanas de tiempo disponibles. La experiencia de otras iniciativas de remediación en la región amazónica sugiere que la falta de consideración de estos factores estacionales ha sido una de las causas más frecuentes de retrasos y sobrecostos en los proyectos de recuperación ambiental, especialmente en aquellas zonas donde la conectividad vial es limitada y el transporte de materiales y equipos depende de vías fluviales o aéreas que también se ven afectadas por las condiciones climáticas.

La disponibilidad de recursos humanos capacitados en técnicas de biorremediación constituye otra condición territorial crítica para la viabilidad de las intervenciones. La región de Loreto, donde se ubica el Lote 192, cuenta con una oferta limitada de profesionales especializados en ingeniería ambiental, microbiología de suelos y gestión de residuos peligrosos. La capacitación de personal local, incluyendo a miembros de las comunidades indígenas que habitan en el área de influencia del lote, representa una

estrategia que no solo contribuye a superar la escasez de recursos humanos calificados, sino que también genera capacidades endógenas que pueden sostenerse en el tiempo y fortalecer la autonomía de las comunidades en la gestión de sus territorios. La literatura sobre desarrollo de capacidades en contextos rurales ha señalado que las intervenciones que incorporan componentes de formación y transferencia de tecnología tienden a ser más sostenibles que aquellas que dependen exclusivamente de personal externo, ya que reducen la dependencia de recursos que pueden volverse inaccesibles una vez que concluyen los proyectos.

Las capacidades institucionales y comunitarias para la sostenibilidad de las intervenciones

La remediación de un pasivo ambiental de la magnitud del Lote 192 requiere no solo de tecnologías apropiadas, sino también de instituciones capaces de sostener las intervenciones a lo largo del tiempo y de garantizar que los recursos asignados se utilicen de manera eficiente y transparente. El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental ha desarrollado capacidades significativas para la caracterización de sitios contaminados y la evaluación de riesgos ambientales, como lo evidencian los más de cien informes analizados en esta investigación. Sin embargo, la capacidad de fiscalización y sanción ha de-

mostrado ser insuficiente para garantizar que las empresas operadoras cumplan con sus obligaciones de remediación, como lo demuestra la persistencia de más de dos mil sitios contaminados identificados desde 1975. La brecha entre la identificación de los sitios y su efectiva recuperación revela limitaciones institucionales que trascienden las capacidades técnicas de la autoridad ambiental y que se relacionan con la disponibilidad de recursos financieros, la complejidad de los procedimientos administrativos y la resistencia de las empresas a asumir los costos de la remediación.

La transición de la operación del Lote 192 a Petroperú, formalizada mediante el contrato de licencia suscrito en febrero de 2023, abre una oportunidad para reconfigurar las condiciones institucionales de la gestión ambiental del lote. La empresa estatal ha iniciado un proceso de reactivación de las operaciones que incluye la incorporación de un socio estratégico, Altamesa Energy, con experiencia en la explotación de hidrocarburos en América Latina. El contrato establece además un fondo social equivalente al 1.5% de la valorización del crudo producido, destinado al desarrollo de las comunidades nativas. Estos elementos configuran un escenario institucional que, si se gestiona adecuadamente, podría proporcionar los recursos y las capacidades necesarias para abordar la remediación de los pasivos ambientales de manera más efectiva que

en el pasado. La condición para que esta oportunidad se materialice es que la remediación ambiental se convierta en una prioridad explícita de la nueva gestión y que se establezcan mecanismos de rendición de cuentas que permitan a las comunidades y a la sociedad civil verificar los avances y exigir el cumplimiento de los compromisos asumidos.

Las comunidades indígenas que habitan en el área de influencia del Lote 192 han desarrollado, a lo largo de décadas de convivencia con la actividad petrolera, capacidades de organización, movilización y vigilancia que constituyen un activo fundamental para la sostenibilidad de las intervenciones de remediación. Las federaciones y organizaciones indígenas han liderado los reclamos al Estado para la remediación y recuperación de los sitios afectados, como lo documenta la literatura sobre el caso, y han acumulado un conocimiento profundo sobre la ubicación y las características de los sitios contaminados que complementa la información técnica generada por las autoridades ambientales. La participación de estas organizaciones en el diseño, la ejecución y el monitoreo de los planes de remediación no solo responde a un imperativo de justicia ambiental, sino que también contribuye a garantizar que las intervenciones respondan a las necesidades y prioridades de las poblaciones afectadas y que los recursos se utilicen de manera transparente. La experiencia internacional en la gestión de pasivos ambientales ha demostrado

que la participación comunitaria es un factor crítico para la sostenibilidad de las intervenciones, ya que las comunidades locales son las primeras interesadas en verificar que los trabajos se realicen correctamente y que los resultados se mantengan en el tiempo.

La articulación entre las capacidades institucionales del Estado, las capacidades técnicas de las empresas operadoras y las capacidades organizativas de las comunidades locales constituye el fundamento de un modelo de gobernanza ambiental que puede superar las limitaciones que han caracterizado la gestión del Lote 192 en el pasado. Este modelo requiere la construcción de espacios de diálogo y coordinación donde los diferentes actores puedan compartir información, definir prioridades y monitorear los avances. La creación de comités de vigilancia ambiental con participación comunitaria, la publicación de información periódica sobre el estado de los sitios contaminados y la realización de auditorías independientes son mecanismos que pueden contribuir a fortalecer la transparencia y la rendición de cuentas. La experiencia de otras iniciativas de gestión ambiental participativa en la Amazonía peruana proporciona lecciones valiosas sobre los factores que favorecen o dificultan la construcción de estos espacios de gobernanza, entre los que destacan la voluntad política de las autoridades, la disposición de las empresas a compartir información y la capacidad de las organizaciones comunitarias para participar de manera

informada y propositiva en los procesos de toma de decisiones.

Un marco de priorización territorial para la asignación de recursos

La magnitud del pasivo ambiental del Lote 192 y la limitación de los recursos disponibles para su remediación hacen indispensable el establecimiento de criterios de priorización que permitan orientar las intervenciones hacia las áreas donde puedan generar los mayores beneficios ambientales y sociales. Los hallazgos de esta investigación proporcionan la base empírica para construir un marco de priorización que considere la severidad de la contaminación, la vulnerabilidad de los ecosistemas afectados, la proximidad a comunidades humanas y la viabilidad técnica y económica de las intervenciones.

La aplicación de estos criterios permitiría concentrar los esfuerzos en los sitios donde la contaminación representa una amenaza más inmediata para la salud humana y los ecosistemas, así como en aquellos donde las condiciones territoriales favorecen la implementación efectiva de las técnicas de remediación. La construcción de este marco requiere la integración de información proveniente de múltiples fuentes, incluyendo los informes de evaluación ambiental del OEFA, los estudios sobre la distribución de las comunidades indígenas y los datos sobre la accesibilidad y las condiciones climáticas de cada sector del lote.

La severidad de la contaminación, medida en términos de las concentraciones de hidrocarburos y metales pesados que superan los estándares de calidad ambiental, constituye el primer criterio de priorización. Los sitios identificados en la cuenca del río Tigre, como S0228 y S0288, donde las concentraciones de hidrocarburos de fracción media y pesada superan ampliamente los límites industriales, deberían ser considerados como prioridad alta para la intervención. La presencia de arsénico y mercurio en algunos puntos de esta cuenca añade una preocupación adicional, ya que estos metales pesados tienen efectos tóxicos persistentes y pueden acumularse en la cadena alimentaria. La vulnerabilidad de los ecosistemas afectados, evaluada en función de la presencia de especies endémicas o en peligro de extinción, la sensibilidad de los hábitats acuáticos y la importancia de los servicios ecosistémicos que proporcionan, constituye el segundo criterio de priorización. La combinación de ambos criterios permite identificar las áreas donde la contaminación representa una amenaza más grave para la biodiversidad y los procesos ecológicos que sustentan la vida en la región.

La proximidad de los sitios contaminados a comunidades humanas que dependen de los recursos naturales para su subsistencia constituye el tercer criterio de priorización. Las comunidades que utilizan el agua de los ríos afectados para consumo, pesca o actividades recreativas están expuestas a riesgos de salud que deben ser considerados

en la priorización de las intervenciones. La identificación de las comunidades en situación de mayor vulnerabilidad, considerando factores como la presencia de niños y mujeres embarazadas, la dependencia de la pesca para la alimentación y la falta de acceso a fuentes alternativas de agua, permite orientar los recursos hacia las áreas donde la contaminación representa una amenaza más inmediata para la salud humana. La participación de las comunidades en la identificación de sus propias prioridades y necesidades constituye un elemento fundamental para garantizar la pertinencia y la legitimidad de las intervenciones, así como para fortalecer su capacidad de vigilancia y control ambiental sobre sus territorios. La experiencia de otras iniciativas de remediación en la región ha demostrado que las intervenciones que incorporan la perspectiva de las comunidades afectadas tienden a ser más efectivas y sostenibles que aquellas que se diseñan sin considerar sus necesidades y expectativas.

La viabilidad técnica y económica de las intervenciones, evaluada en función de la accesibilidad de los sitios, la disponibilidad de recursos humanos y materiales y la adecuación de las técnicas de remediación a las condiciones territoriales, constituye el cuarto criterio de priorización. Los sitios que presentan condiciones más favorables para la implementación de las técnicas de biorremediación evaluadas, como la disponibilidad de agua, la presencia de comunidades dispuestas a participar y la existencia

de infraestructura de acceso, podrían ser abordados en una primera fase, generando resultados tangibles que demuestren la efectividad de las intervenciones y generen confianza entre los actores involucrados. La experiencia de otras iniciativas de remediación sugiere que la obtención de resultados tempranos en sitios piloto contribuye a movilizar apoyos y recursos para escalar las intervenciones a otras áreas, así como a generar aprendizaje sobre las adaptaciones necesarias para operar en condiciones amazónicas. La articulación de estos cuatro criterios en un marco de priorización territorial permite construir una herramienta de gestión que oriente la asignación de recursos de manera transparente y fundamentada, contribuyendo a superar la dispersión y la falta de coordinación que han caracterizado las iniciativas de remediación en el pasado.

La articulación de estos criterios en un marco de priorización territorial permite construir una herramienta de gestión que oriente la asignación de recursos de manera transparente y fundamentada. La aplicación de este marco requiere la construcción de una base de datos georreferenciada que integre la información sobre la distribución de los contaminantes, la ubicación de las comunidades, la presencia de ecosistemas sensibles y las condiciones de accesibilidad de cada sitio. La existencia de sistemas de información geográfica y de herramientas de análisis espacial facilita la construcción de esta base de datos y

la generación de mapas de priorización que pueden ser utilizados por los tomadores de decisiones. La publicación de estos mapas y de los criterios utilizados para su elaboración contribuye a la transparencia del proceso y permite a las comunidades y a la sociedad civil verificar que las decisiones se toman sobre la base de criterios objetivos y no de consideraciones políticas o económicas. La experiencia de otras iniciativas de gestión ambiental en la región ha demostrado que la transparencia en la toma de decisiones es un factor crítico para generar confianza entre los actores involucrados y para asegurar la legitimidad de las intervenciones.

Consideraciones finales sobre la gestión territorial de la remediación

El análisis desarrollado en este capítulo permite extraer conclusiones que complementan y enriquecen los hallazgos presentados en los capítulos precedentes. En primer lugar, se ha establecido que la remediación de un pasivo ambiental de la magnitud del Lote 192 no puede reducirse a la selección de la técnica más eficiente en condiciones de laboratorio, sino que debe considerar las particularidades del territorio donde se pretende intervenir. Las condiciones de accesibilidad, la estacionalidad climática, la disponibilidad de recursos humanos capacitados y las características de los suelos y los ecosistemas determi-

nan en la práctica las posibilidades reales de implementación de las técnicas de biorremediación. La consideración de estos factores desde las etapas iniciales de la planificación es una condición necesaria para evitar los retrasos, los sobre costos y los fracasos que han caracterizado muchas iniciativas de remediación en la región amazónica. La lección que emerge de esta constatación es que la eficiencia técnica de una solución, medida en condiciones controladas, constituye una condición necesaria pero no suficiente para garantizar el éxito de una intervención en el territorio.

En segundo lugar, se ha argumentado que la sostenibilidad de las intervenciones de remediación depende de la existencia de capacidades institucionales y comunitarias que permitan sostener los procesos a lo largo del tiempo. La transición de la operación del Lote 192 a Petroperú y la creación de un fondo social para el desarrollo de las comunidades nativas configuran un escenario institucional que, si se gestiona adecuadamente, podría proporcionar los recursos y las capacidades necesarias para abordar la remediación de manera más efectiva que en el pasado. La participación de las comunidades indígenas en el diseño, la ejecución y el monitoreo de los planes de remediación no solo responde a un imperativo de justicia ambiental, sino que también contribuye a garantizar que las intervenciones respondan a las necesidades y prioridades de

las poblaciones afectadas. La articulación entre las capacidades del Estado, las empresas y las comunidades constituye el fundamento de un modelo de gobernanza ambiental que puede superar las limitaciones que han caracterizado la gestión del lote en el pasado.

En tercer lugar, se ha propuesto un marco de priorización territorial que permite orientar la asignación de recursos hacia las áreas donde las intervenciones puedan generar los mayores beneficios ambientales y sociales. La aplicación de este marco, basado en la severidad de la contaminación, la vulnerabilidad de los ecosistemas, la proximidad a comunidades humanas y la viabilidad técnica y económica de las intervenciones, permitiría concentrar los esfuerzos en los sitios donde la contaminación representa una amenaza más inmediata y donde las condiciones territoriales favorecen la implementación efectiva de las técnicas de remediación. La construcción de una base de datos georreferenciada y la publicación de mapas de priorización contribuyen a la transparencia del proceso y permiten a las comunidades y a la sociedad civil verificar que las decisiones se toman sobre la base de criterios objetivos. La implementación de este marco requiere la coordinación entre las diferentes entidades del Estado, las empresas operadoras y las organizaciones comunitarias, así como la asignación de recursos financieros y humanos suficientes para sostener las intervenciones en el tiempo.

Las reflexiones desarrolladas en este capítulo se articulan con los hallazgos de los capítulos precedentes para configurar una comprensión integral de los desafíos de la remediación ambiental en el Lote 192. La caracterización de la contaminación, la evaluación de las técnicas de biorremediación y el análisis de las condiciones territoriales e institucionales constituyen dimensiones complementarias de un mismo problema que requiere soluciones integradas. La remediación efectiva de los pasivos ambientales del Lote 192 no es solo un desafío técnico que requiere la selección de las técnicas más eficientes, sino también un desafío territorial que requiere la consideración de las condiciones específicas del contexto amazónico y la construcción de capacidades institucionales y comunitarias para sostener las intervenciones en el tiempo. La obra que aquí concluye no pretende ofrecer una solución definitiva, sino establecer un marco de comprensión y un conjunto de herramientas que contribuyan a la construcción de un futuro en el que la gestión de los pasivos ambientales de la industria petrolera en la Amazonía peruana sea verdaderamente efectiva, sostenible y equitativa para todos los actores involucrados.

Capítulo 6

*Síntesis de hallazgos y orientaciones para la
recuperación ambiental del Lote 192*

La persistencia de la contaminación y sus implicaciones para la gestión ambiental

El análisis del daño ambiental en el Lote 192 reveló que, aunque casi ninguna de las zonas evaluadas supera el Estándar de Calidad Ambiental para la fracción ligera de hidrocarburos, sí se detecta una contaminación significativa por las fracciones media y pesada, así como por metales pesados en las cuencas de los ríos Pastaza, Corrientes y Tigre. En particular, la cuenca del río Pastaza muestra contaminación predominante por hidrocarburos de fracción media, bario, cromo y etilbenceno; la cuenca del río Corrientes está afectada por hidrocarburos de fracción media, cromo y bario; mientras que la cuenca del río Tigre presenta presencia de hidrocarburos de fracción media y pesada. Estos resultados reflejan la persistencia de hidrocarburos y metales en el ambiente, lo que representa un riesgo potencial para los ecosistemas y las comunidades que dependen de ellos para su subsistencia y actividades tradicionales. La distribución desigual de los contaminantes en las diferentes cuencas y puntos de muestreo sugiere que las estrategias de remediación deben ser diseñadas considerando las condiciones específicas de cada sector, evitando la aplicación de soluciones homogéneas que no respondan a la diversidad de situaciones encontradas en el territorio.

La persistencia de los contaminantes en el suelo amazónico constituye un fenómeno que trasciende la mera presencia física de las sustancias tóxicas para convertirse en una amenaza latente que se proyecta a lo largo del tiempo. Los hidrocarburos de fracción media y pesada, caracterizados por su mayor peso molecular y su menor volatilidad, tienden a adsorberse con fuerza en las partículas del suelo y a resistir los procesos naturales de degradación, permaneciendo en el ambiente durante períodos que pueden extenderse por décadas. Esta recalcitrancia inherente a las fracciones más pesadas explica por qué, a pesar del tiempo transcurrido desde los derrames originales, las concentraciones de estos contaminantes continúan superando los límites establecidos por la normativa ambiental. La situación se agrava por la presencia simultánea de metales pesados como el bario, el cromo y el plomo, que no son susceptibles de degradación biológica y que, por el contrario, pueden acumularse y redistribuirse en el ambiente a través de procesos de intercambio iónico y lixiviación. La combinación de contaminantes orgánicos e inorgánicos crea una matriz compleja que requiere estrategias de remediación diferenciadas y complementarias.

La implicación más directa de esta persistencia es la exposición continua de los ecosistemas y las comunidades locales a sustancias tóxicas que pueden generar efectos adversos sobre la salud y el bienestar. Los hidrocarburos de fracción media y pesada contienen compuestos aromá-

ticos policíclicos que han sido identificados como carcinogénicos y mutagénicos, mientras que los metales pesados como el plomo y el cromo hexavalente pueden afectar el sistema nervioso, los riñones y el hígado, especialmente en poblaciones vulnerables como los niños y las mujeres embarazadas. La exposición puede ocurrir por múltiples vías, incluyendo el contacto directo con el suelo contaminado, la ingestión de agua y alimentos contaminados, y la inhalación de vapores y partículas. La literatura científica ha documentado que las comunidades indígenas que habitan en zonas de influencia petrolera presentan niveles elevados de metales pesados en sangre y orina, lo que evidencia la magnitud del problema y la urgencia de implementar medidas de remediación efectivas.

La gestión ambiental del Lote 192 enfrenta, por lo tanto, el desafío de abordar una contaminación histórica que se ha acumulado durante décadas y que no puede ser resuelta mediante intervenciones puntuales o aisladas. Se requiere un enfoque integral que combine la remediación de los sitios ya contaminados con la prevención de nuevos derrames y la implementación de sistemas de monitoreo que permitan detectar tempranamente cualquier anomalía. La experiencia internacional en la gestión de pasivos ambientales en la industria petrolera sugiere que los programas de remediación más exitosos son aquellos que cuentan con un financiamiento sostenido, una supervisión independiente y una participación de las comuni-

dades afectadas. La transparencia en la comunicación de los resultados y la rendición de cuentas por parte de los responsables de la contaminación constituyen elementos fundamentales para generar confianza y asegurar la legitimidad de las intervenciones. La gestión ambiental del Lote 192 no es solo un desafío técnico, sino también un imperativo ético y legal que el Estado peruano y las empresas operadoras deben asumir con responsabilidad y compromiso.

La selección de técnicas de remediación y su fundamentación empírica

En este estudio se ha determinado que la biorremediación con lodos activados constituye la técnica más efectiva para la remoción de las fracciones media y pesada de hidrocarburos, mientras que la biorremediación mediante atenuación natural y compost mostró una mayor eficiencia en la degradación de los compuestos de fracción ligera. Estos resultados destacan la importancia de seleccionar el método de biorremediación en función del tipo de hidrocarburo presente en el suelo, optimizando así los procesos de recuperación ambiental y asegurando que los recursos invertidos se utilicen de la manera más eficiente posible. La complementariedad de las técnicas evaluadas sugiere que una estrategia integrada que combine diferentes métodos según las condiciones específicas de cada si-

tio podría ofrecer resultados superiores a la aplicación de una sola técnica de manera generalizada. La posibilidad de adaptar las intervenciones a las características particulares de cada área contaminada constituye una ventaja significativa en un contexto tan complejo y diverso como el de la Amazonía peruana.

La fundamentación empírica de estos hallazgos se sustenta en la comparación sistemática de los resultados obtenidos mediante la aplicación de diferentes técnicas de biorremediación en condiciones controladas, así como en la evaluación de las concentraciones de hidrocarburos totales de petróleo y metales pesados en los suelos de las cuencas de los ríos Pastaza, Corrientes y Tigre. Los ensayos realizados con lodos activados demostraron una capacidad significativa para degradar las fracciones más pesadas de hidrocarburos, alcanzando porcentajes de remoción que oscilan entre el treinta y dos por ciento y el cuarenta y seis por ciento para las fracciones medias, y entre el cuarenta por ciento y el cincuenta por ciento para las fracciones pesadas en un período de noventa días de tratamiento. La relación directamente proporcional entre la dosis de lodo aplicada y la eficiencia de remoción sugiere que es posible optimizar los resultados ajustando la cantidad de inóculo según la concentración inicial de contaminantes, lo que proporciona un margen de maniobra para adaptar el tratamiento a las condiciones específicas de cada sitio.

La biorremediación mediante atenuación natural y compost mostró una eficiencia notablemente superior en la degradación de la fracción ligera, alcanzando reducciones de hasta el noventa y nueve por ciento en sesenta días, aunque su efectividad sobre las fracciones más pesadas resultó limitada por la propia naturaleza recalcitrante de estos compuestos. Este hallazgo es consistente con la literatura científica que señala que los hidrocarburos de bajo peso molecular son más fácilmente biodegradables que los de alto peso molecular, debido a su mayor solubilidad y biodisponibilidad. La adición de compost como bioestimulante no solo aporta nutrientes esenciales para la actividad microbiana, sino que también mejora las propiedades físicas del suelo, aumentando su porosidad y capacidad de retención de agua, lo que crea condiciones más favorables para la degradación de los contaminantes. La combinación de atenuación natural con bioestimulación representa una opción de bajo costo y bajo impacto ambiental que puede ser especialmente adecuada para sitios con contaminación predominantemente ligera o para etapas finales de tratamiento después de la aplicación de técnicas más intensivas.

Tras comparar cuatro métodos de biorremediación aplicados a suelos contaminados por hidrocarburos con características de la selva amazónica, se determinó que la biorremediación con lodos activados es la opción más efectiva para las fracciones medias y pesadas. Este método mostró

la mayor eficiencia en la degradación de hidrocarburos, alcanzando porcentajes de remoción de entre el cincuenta y el sesenta por ciento de los hidrocarburos totales de petróleo, y los tiempos de tratamiento más reducidos en comparación con las demás alternativas evaluadas. Su desempeño superior resalta su potencial como una estrategia óptima para la recuperación de suelos impactados por hidrocarburos, proporcionando una solución eficaz y viable para su aplicación en escenarios similares dentro de la Amazonía peruana y sudamericana. La capacidad de este método para degradar las fracciones más pesadas y persistentes de los hidrocarburos lo posiciona como una herramienta clave para abordar la contaminación histórica que afecta al Lote 192 y a otras áreas con problemáticas análogas. La disponibilidad de lodos activados como subproducto de plantas de tratamiento de aguas residuales representa además una oportunidad para la economía circular, transformando un residuo en un insumo para la recuperación ambiental.

Orientaciones para la implementación de estrategias de remediación y monitoreo

Es esencial establecer planes de monitoreo ambiental en las cuencas de los ríos Pastaza, Corrientes y Tigre para evaluar la evolución de la contaminación por hidrocarburos y metales pesados, así como la efectividad de las

estrategias de remediación implementadas. Estos planes deben incluir la medición periódica de las concentraciones de contaminantes en el suelo, los sedimentos y las aguas superficiales, con el fin de detectar cualquier cambio significativo en las condiciones ambientales y ajustar las intervenciones según sea necesario. La información generada por estos monitoreos debe ser sistematizada y puesta a disposición de las autoridades competentes, las comunidades locales y las organizaciones de la sociedad civil, promoviendo la transparencia y la rendición de cuentas en la gestión ambiental del lote. La participación de las comunidades indígenas en el diseño y ejecución de los planes de monitoreo constituye un elemento fundamental para garantizar que las intervenciones respondan a sus necesidades y prioridades, así como para fortalecer su capacidad de vigilancia y control ambiental sobre sus territorios.

Se debe elegir el método de biorremediación adecuado según el tipo de hidrocarburo presente en el suelo. La biorremediación con lodos activados es ideal para la remoción de las fracciones media y pesada, mientras que la atenuación natural y el compost son más efectivos para la degradación de la fracción ligera. La selección del método debe basarse en un diagnóstico previo que determine la composición y concentración de los contaminantes en cada sitio, así como en la evaluación de las condiciones ambientales

locales que puedan afectar la eficiencia del tratamiento. La implementación de programas de capacitación para el personal técnico encargado de la remediación y para las comunidades locales que participen en las actividades de monitoreo constituye una inversión necesaria para garantizar la sostenibilidad de las intervenciones a largo plazo. La documentación sistemática de los resultados obtenidos en cada intervención permitirá acumular conocimiento y experiencia que pueden ser aplicados en futuras acciones de remediación en la región amazónica.

Se recomienda considerar la biorremediación con lodos activados como una estrategia principal en futuras acciones de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos en zonas geológicamente similares, debido a su alta eficiencia en la degradación de compuestos más pesados y su menor tiempo de tratamiento en comparación con otras alternativas. La implementación de esta técnica debe ir acompañada de un monitoreo continuo que permita verificar la reducción de las concentraciones de contaminantes y detectar cualquier efecto secundario no previsto sobre el suelo o los ecosistemas circundantes. La combinación de esta técnica con otras estrategias complementarias, como la fitorremediación para las fracciones más ligeras o la estabilización química para los metales pesados, podría ofrecer una solución integral que aborde la totalidad de los contaminantes presentes en el suelo. La experiencia acumulada en el Lote 192 y en otras áreas

contaminadas de la Amazonía peruana proporciona lecciones valiosas que deben ser incorporadas en el diseño de futuras intervenciones de remediación ambiental. La remediación efectiva de estos pasivos ambientales no solo es una obligación legal y ética, sino también una condición necesaria para garantizar la sostenibilidad de las operaciones petroleras y la protección de los derechos de las comunidades que habitan en las zonas de influencia de la actividad extractiva.

Referencias

- Aguilar-García, J., & Jiménez-Ojeda, A. (2020). Contaminación del suelo: Causas, consecuencias y estrategias de mitigación. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 12(4), 345–361.
- Alonso, C., Vela, D., & Chávez, G. (2018). Impacto de las actividades extractivas en los ecosistemas acuáticos amazónicos: Caso del Lote 192. *Revista de Hidrología y Ecología*, 12(3), 45–60.
- Bayona Calderón, L. de los M. (2025). *Evaluación ambiental y propuesta de remediación para reducir el daño ocasionado en el área del lote 192* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Piura].
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2019). *La naturaleza y las propiedades de los suelos*. Pearson.
- Chang, I. (2020). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburo mediada por Pseudomonas spp. en biorreactores*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Chávez, P., Rodríguez, L., & Gutiérrez, J. (2020). Impacto ambiental de los hidrocarburos en suelos amazónicos. *Revista Científica Ambiental*, 12(3), 45–59.
- Conde Williams, A. D. (2013). Efectos nocivos de la contaminación ambiental sobre la embarazada. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 51(2), 226–238.
- Deley, Á. (2010). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo del campamento Sacha 161 utilizando el hongo *Pleurotus ostreatus*. *Nova*, 4(5), 82–90.

- Díaz, A., Pérez, R., & Hernández, J. (2019). *Propiedades físicas y químicas del petróleo parafínico y sus aplicaciones industriales*. Editorial Tecnológica.
- EarthRights International. (2020). *Más de 470 derrames petroleros afectaron la Amazonía peruana entre 2000 y 2019*. <https://goo.su/koBeo>
- Fernández Valqui, R., & Pariente Mondragón, E. (2020). *Eficiencia de la biorremediación de hidrocarburos totales de petróleo mediante atenuación natural y adición de compost como bioestimulante*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- Figuerola, J., Chávez, P., & Rodríguez, L. (2020). Evaluación de riesgos ambientales en zonas petroleras del Perú. *Revista de Estudios Amazónicos*, 14(3), 89–102.
- Gerónimo, A., & Vásquez, C. (2017). *Determinación de la eficiencia de biorremediación con lodos activados en suelo contaminado por hidrocarburos* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao].
- Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. (2019). *Características climáticas de la Amazonía peruana*. <https://www.iiap.org.pe>
- Lal, R., & Stewart, B. A. (2021). *Degradación y restauración del suelo en África*. CRC Press.
- Liu, S. (2026). Big Data Solution for Exploration and Development Business of Oil and Gas Field Enterprises. En *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2025*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-92-1839-4_68

- López, C., Martínez, P., & Gómez, E. (2017). Impacto ambiental de los hidrocarburos asfálticos y su tratamiento en el contexto amazónico. *Revista de Ecología y Medio Ambiente*, 33(2), 104–112.
- Ministerio de Cultura del Perú. (2015). *Lote 192 (2015). Consulta Previa*. <https://consultaprevia.cultura.gob.pe/proceso/lote-192-2015>
- Ministerio del Ambiente. (2022). *Guía práctica para la recuperación de áreas degradadas por minería aurífera en la Amazonía peruana*. MINAM.
- Montano, Y., Tapia, P. M., Fow, A., & Fuentealba, B. (2022). *Fitorremediación: Una alternativa para tratar la contaminación ambiental*. Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2020). *Informe de evaluación ambiental del Lote 192*. OEFA.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2022). *Diagnóstico de la calidad de suelo del Lote 192, provincias de Loreto y Datem del Marañón, departamento de Loreto*. OEFA.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2020). *Condiciones ambientales y su impacto en las operaciones petroleras en Loreto*. <https://www.osi-nergmin.gob.pe>
- Petroperú. (2023). *Contrato de licencia para la explotación del Lote 192*. Petroperú.

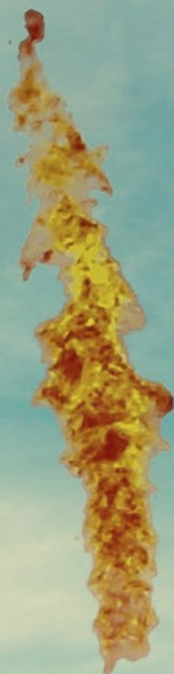
- Petroperú. (s. f.). *Lote 192—Lotes petroleros*. <https://goo.su/MA3k>
- Ramírez-Villalobos, M. (2018). *Contaminación de suelos y su impacto ambiental: Nuevas estrategias para su remediación*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ríos, J., & Sánchez, M. (2020). Impactos ambientales y sociales de la actividad petrolera en la región amazónica peruana: Un análisis del Lote 192. *Revista Peruana de Geografía y Medio Ambiente*, 12(3), 45–61. <https://doi.org/10.1234/rpgma.2020.12345>
- Ríos, M. (2021). *Efectos de la actividad petrolera en la calidad de los suelos amazónicos: Caso Lote 192* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Sánchez, M., Martínez, A., & Pérez, R. (2018). Composición y efectos ambientales del petróleo. *Revista de Ciencias del Medio Ambiente*, 16(3), 204–218.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Reporte climático de Loreto*. <https://www.senamhi.gob.pe>
- Suarez Beltrán, L. (2013). *Biorremediación: Fundamentos y aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia.
- Talavera, C., & Gómez, R. (2019). Análisis de contaminación hídrica y suelos en áreas de explotación petrolera: Lote 192, Perú. *Revista de Estudios Amazónicos*, 14(2), 123–134.
- Vásquez, F., & Torres, E. (2018). *Evaluación del impacto de actividades petroleras en suelos amazónicos: Un enfoque técnico en el Lote 192* (Informe técnico). Instituto de Estudios Ambientales Amazónicos.



Religación
Press
Ideas desde el Sur Global



Religación
Press



ISBN: 978-9907-845-33-4



9 789907 845334