



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS DE LA ZONA NORESTE
DE LA AMAZONIA ECUATORIANA CONTAMINADOS
POR HIDROCARBUROS NO VOLÁTILES APLICANDO
COMPOST EN LABORATORIO.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

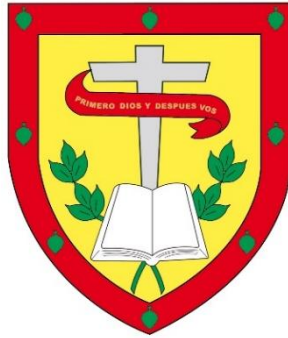
AUTOR: JOSÉ MOISÉS CÁRDENAS MOROCHO

DIRECTOR: MGS. AUGUSTO POLIBIO MARTÍNEZ VEGA

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCION**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS DE LA ZONA NORESTE DE LA
AMAZONIA ECUATORIANA CONTAMINADOS POR
HIDROCARBUROS NO VOLÁTILES APLICANDO COMPOST EN
LABORATORIO.

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: JOSÉ MOISÉS CÁRDENAS MOROCHO

DIRECTOR: MGS. AUGUSTO POLIBIO MARTÍNEZ VEGA

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

José Moisés Cárdenas Morocho portador de la cédula de ciudadanía N° 0105924344. Declaro ser el autor de la obra: "Biorremediación de suelos de la zona noreste de la amazonía ecuatoriana contaminados por hidrocarburos no volátiles aplicando compost en laboratorio", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 27 de junio de 2025

F: 

José Moisés Cárdenas Morocho

0105924344

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Moisés Cárdenas Morocho, bajo mi supervisión.

AUGUSTO
POLIBIO
MARTINEZ
VEGA

Firmado digitalmente
por AUGUSTO POLIBIO
MARTINEZ VEGA
Fecha: 2025.06.26

Augusto Polibio Martínez Vega.

DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres que han estado en todo momento apoyándome, a mis hermanas a mi abuelita, primos, primas y amigos me siento feliz por tenerlos a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a Dios Padre que me ha dado la experiencia dentro de la vida universitaria y permitirme convertirme en un profesional.

Quiero dar gracias a mis distinguidos padres, que han sido el pilar fundamental en mi formación profesional y me han inculcado valores de respeto, responsabilidad y perseverancia para ser una persona de bien. Han sido el motor que me permitió culminar este camino. A mis hermanas que me han sabido apoyar y han sido un ejemplo de superación. A mi abuelita que estaría muy feliz al verme alcanzar esta meta, a la cual he dedicado horas de esfuerzo.

A todos mis compañeros que me han acompañado en esta travesía, cada uno de ustedes han hecho que este viaje fuera más llevadero y significativo.

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mi director de tesis, el Mg. Augusto Polibio Martínez Vega. Su experiencia, comprensión y paciencia contribuyeron a mi experiencia en el complejo y gratificante camino de la investigación. De igual manera, agradecido al Blgo. Vinicio Santillán que me ha ayudado en la parte estadística y al proyecto que me facilitó el compost resultante del proyecto de investigación: “Cuantificación de gases de efecto invernadero en la sucesión microbiológica de compostaje doméstico automatizado con aplicación de microorganismos benéficos”.

No tengo más palabras para expresar mi gratitud por su gran apoyo durante este viaje.

RESUMEN

Este proyecto se realizó con la finalidad de remediar suelos contaminados por hidrocarburos pertenecientes a la provincia Francisco de Orellana. La investigación de tipo experimental tiene como objetivo principal la biorremediación de suelos, a través del uso y de los beneficios que posee el compost rico en nutrientes y comunidades microbianas. Esta investigación de biorremediación ex situ, se realizó en el laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca, donde se realizó los diferentes procedimientos como la extracción Soxhlet. La biorremediación se realizó en 12 unidades experimentales con 4 tratamientos y con 3 repeticiones, cada unidad experimental tiene un total de 2 kg de suelo contaminado, las cuales se aplicaron 4 dosis diferentes de compost al 0% (tratamiento testigo), 10%, 20% y 30% y se determinó cual posee una mejor capacidad para reducir el contaminante. Los resultados indican que el uso de compost en diversas concentraciones mejoró notablemente la descomposición de hidrocarburos totales de petróleo (HTPs) en suelos contaminados. El tratamiento utilizando un 10 % de compost (T1) resultó ser el más eficaz al lograr una reducción del 41,25 % en comparación a solo un 4,12 % en el grupo control (T0). El análisis estadístico mostró diferencias significativas al comparar el tratamiento T0 respecto a los demás; en cambio no se encontraron diferencias importantes entre T1, T2 y T3. Esto indica que el compost potencia el proceso de biorremediación desde su aplicación inicial. Este proceso ha permitido acelerar la degradación del hidrocarburo, reduciendo la contaminación del suelo y mejorando su calidad, lo que lo convierte en un enfoque viable y rentable para hacer frente a la contaminación por vertidos de petróleo en la región.

Palabras clave: suelo contaminado, comunidades microbianas, degradación, extracción Soxhlet.

ABSTRACT

This project aimed to remediate hydrocarbon-contaminated soils in the province of Francisco de Orellana. The main objective of the experimental investigation is to bioremediate soils using compost, which is rich in nutrients and microbial communities. This ex-situ bioremediation research was conducted at the CIITT laboratory of the Catholic University of Cuenca, where various procedures, including Soxhlet extraction, were performed. Likewise, the bioremediation was conducted using 12 experimental units with four treatments and three replicates. Each experimental unit contained 2 kg of contaminated soil. To this end, four different compost doses were applied: 0% (control treatment), 10%, 20%, and 30%. The aim was to determine which dose had the greatest capacity to reduce the contaminant. The results indicate that the use of compost in various concentrations significantly improved the degradation of total petroleum hydrocarbons (TPHs) in contaminated soils. The treatment using 10% compost (T1) proved to be the most effective, achieving a 41.25% reduction compared to only 4.12% in the control group (T0). Statistical analysis revealed significant differences between T0 and the other treatments. However, no significant differences were found among T1, T2, and T3, indicating that compost enhances the bioremediation process from its initial application. This process accelerated hydrocarbon degradation, reduced soil contamination, and improved soil quality, making it a viable and cost-effective approach to address oil spill contamination in the region.

Keywords: contaminated soil, microbial communities, degradation, Soxhlet extraction.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD	I
CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ANEXOS	XII
CAPÍTULO I	- 1 -
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 OBJETIVOS.	- 3 -
1.1.1 <i>Objetivo general.</i>	- 3 -
1.1.2 <i>Objetivo específico.</i>	- 3 -
CAPÍTULO II	- 3 -
2. REVISIÓN DE LITERATURA	- 3 -
2.1 EL SUELO	- 3 -
2.1.1 <i>Estructura del suelo</i>	- 3 -
2.1.2 <i>Granulometría del suelo</i>	- 5 -
2.1.3 <i>Funciones del suelo</i>	- 5 -
2.1.4 <i>Características físicas del suelo</i>	- 5 -
2.1.5 <i>Características químicas del suelo</i>	- 8 -
2.1.6 <i>Características biológicas del suelo</i>	- 9 -
2.1.7 <i>Importancia del suelo</i>	- 10 -
2.1.8 <i>Contaminación del suelo</i>	- 11 -
2.1.9 <i>Tipos de contaminación del suelo</i>	- 12 -
2.2 HIDROCARBUROS	- 12 -
2.2.1 <i>Tipos de hidrocarburos</i>	- 13 -
2.2.2 <i>Hidrocarburos volátiles y no volátiles</i>	- 14 -
2.3 CONTAMINACIÓN A CAUSA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS	- 15 -
2.4 BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA EXPLOTACIÓN PETROLERA EN ECUADOR	- 16 -
2.5 IMPACTOS AMBIENTALES DE LA EXPLOTACIÓN PETROLERA EN ECUADOR	- 16 -
2.6 CONTAMINACIÓN DE SUELO POR DERRAMES DE PETRÓLEO EN ECUADOR	- 17 -
2.7 IMPACTOS DE HIDROCARBUROS EN EL SUELO	- 18 -
2.8 REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	- 19 -
2.8.1 <i>Tipos de tecnologías de remediación de suelos contaminados</i>	- 19 -
2.9 BIORREMEDIACIÓN	- 20 -
2.9.1 <i>Fundamento bioquímico de la biorremediación</i>	- 20 -
2.9.2 <i>Esquema de las reacciones</i>	- 21 -
2.9.3 <i>Ventajas</i>	- 21 -
2.9.4 <i>Desventajas</i>	- 21 -

2.9.5	Proceso de la biorremediación	- 21 -
2.10	MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	- 22 -
2.11	MÉTODO SOXHLET PARA LA DETERMINACIÓN DE CONTAMINACIÓN DE SUELOS	- 23 -
2.12	COMPOSTAJE	- 23 -
2.12.1	Clasificación de sistemas de compostaje	- 25 -
2.12.2	Fases del compostaje	- 25 -
2.12.3	Beneficios del compost en el suelo	- 26 -
2.12.4	Calidad del compost	- 28 -
2.13	MATERIA COMPOSTABLE	- 28 -
2.13.1	Beneficios de la materia compostable y organismos	- 29 -
2.13.2	Principales tipos de microorganismos benéficos presentes en el compostaje	- 30 -
2.14	MARCO LEGAL	- 31 -
2.14.1	De las actividades que degradan la calidad del suelo	- 31 -
2.15	LÍMITES PERMISIBLES	- 32 -
CAPÍTULO III		- 33 -
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	- 33 -
3.1	UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	- 33 -
3.2	COORDENADAS Y LÍMITES	- 33 -
3.3	INFORMACIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO	- 34 -
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	- 35 -
3.5	METODOLOGÍA APLICADA	- 35 -
3.5.1	Obtención de muestras	- 35 -
3.5.2	Características iniciales del suelo	- 39 -
3.5.3	Preparación de los tratamientos	- 46 -
3.5.4	Cuantificación de HTPs	- 48 -
3.6	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS	- 53 -
CAPÍTULO IV		- 54 -
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 54 -
4.1	RESULTADO DEL PH	- 54 -
4.2	MONITOREO DE TEMPERATURA	- 54 -
4.3	RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS	- 55 -
4.4	CONCENTRACIÓN DE HTPs	- 57 -
4.4.1	Concentración de HTPs inicial de la experimentación	- 57 -
4.4.2	Concentración de HTPs en los 8 días de experimentación	- 57 -
4.4.3	Concentración de HTPs a los 16 días de experimentación	- 58 -
4.4.4	Concentración de HTPs a los 26 días de experimentación	- 59 -
4.4.5	Concentración de HTPs en los 50 días de experimentación	- 60 -
4.5	PROYECCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS EN LOS 50 DÍAS DE ESTUDIO	- 61 -
4.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	- 66 -
4.6.1	Hipótesis	- 66 -
4.6.2	Prueba de Post-Hoc de Tukey	- 67 -
4.6.3	Diferencias entre medias	- 67 -
4.7	DISCUSIÓN	- 69 -
CAPÍTULO V		- 71 -
5.	CONCLUSIONES	- 71 -
CAPÍTULO VI		- 72 -
6.	RECOMENDACIONES	- 72 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		- 73 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pirámide de las diferentes texturas del suelo.	- 6 -
Figura 2: Estructura del alcano.	- 13 -
Figura 3: Ubicación de área afectada	- 34 -
Figura 4: Tratamiento de biorremediación.	- 35 -
Figura 5: Identificación de puntos para la obtención de muestras.	- 37 -
Figura 6: Colocación de estacas en los puntos elegidos.	- 37 -
Figura 7: Recolección de muestras de los diferentes puntos.	- 38 -
Figura 8: Muestras recolectadas.	- 38 -
Figura 9: Homogeneización de las muestras.	- 39 -
Figura 10: Mezcla del agua destilada con el suelo.	- 40 -
Figura 11: Muestras en reposo.	- 40 -
Figura 12: Obtención del pH.	- 41 -
Figura 13: Peso del Picnómetro.	- 41 -
Figura 14: Picnómetro con el suelo y agua destilada.	- 42 -
Figura 15: Muestras de suelo para la retención de humedad.	- 43 -
Figura 16: Agregación del agua para su lavado de suelo.	- 43 -
Figura 17: Escurrimiento de la muestra.	- 44 -
Figura 18: Suelo lavado.	- 44 -
Figura 19: Máquina tamizadora.	- 45 -
Figura 20: Suelo tamizado.	- 45 -
Figura 21: Pesaje de compost para las muestras.	- 46 -
Figura 22: Aplicación de compost en la muestra.	- 47 -
Figura 23: Mezcla del compost con el suelo.	- 47 -
Figura 24: Humectación de las muestras.	- 48 -
Figura 25: Pesado de la muestra de suelo.	- 48 -
Figura 26: Procesos de desecado de las muestras en la estufa por 24h a 110 C°.	- 49 -
Figura 27: Proceso de desecado de las muestras antes de la extracción por Soxhlet.	- 49 -
Figura 28: Preparación de los matraces con adicción de alcohol metílico para la extracción por Soxhlet.	- 50 -
Figura 29: Preparación del matraz de ebullición en el equipo Soxhlet.	- 51 -
Figura 30: Colocación de las muestras dentro del cartucho de extracción.	- 51 -
Figura 31: Proceso de extracción de HTPs en el solvente alcohol metílico, de las muestras contaminadas, por medio del Soxhlet.	- 52 -
Figura 32: Alcohol metílico en el primer día de extracción.	- 52 -
Figura 33: Extracto de HTPs en alcohol metílico en el último día de extracción.	- 53 -
Figura 34: Curva Granulométrica.	- 56 -
Figura 35: Testigo al 0% de compost.	- 62 -
Figura 36: Tratamiento al 10% de compost.	- 63 -
Figura 37: Tratamiento T2 al 20% de compost.	- 63 -
Figura 38: Tratamiento al 30% compost.	- 64 -
Figura 39: Concentración de HTPs por cada tratamiento en mg/kg de suelo.	- 65 -
Figura 40: Profundidad de 30cm para la obtención del suelo.	- 79 -
Figura 41: Área contaminada por derrame.	- 79 -
Figura 42: Trituración de suelo para análisis.	- 80 -
Figura 43: Resultado del alcohol metílico de la tercera repetición.	- 80 -
Figura 44: Se encontró gusano blanco en el último día de la biorremediación.	- 81 -
Figura 45: Recolección de muestras.	- 81 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación del crudo por número API y densidades. _____	- 13 -
Tabla 2: Técnicas de compostaje. _____	- 25 -
Tabla 3: Parámetros de calidad de compost según la organización mundial de la salud. _____	- 28 -
Tabla 4: Materia orgánica apropiada para iniciar un adecuado proceso de compostaje. _____	- 29 -
Tabla 5: Límites permisibles de calidad del suelo _____	- 32 -
Tabla 6: Temperatura registrada en °C. _____	- 54 -
Tabla 7: Promedio de humedad en porcentaje. _____	- 55 -
Tabla 8: Pesos en gramos y porcentaje de suelo retenidos por los 3 diferentes tamices. _____	- 56 -
Tabla 9: Concentración de HTPs en el primer análisis. _____	- 57 -
Tabla 10: Concentración de HTPs en el segundo análisis. _____	- 58 -
Tabla 11: Concentración de HTPs en el tercer análisis. _____	- 59 -
Tabla 12: Concentración de HTPs del cuarto análisis. _____	- 60 -
Tabla 13: Concentración de HTPs en el quinto análisis. _____	- 61 -
Tabla 14: Promedios de la concentración HTPs en el transcurso del tiempo, en mg/kg. _____	- 61 -
Tabla 15: Porcentaje de degradación de HTPs de los diferentes tratamientos. _____	- 62 -
Tabla 16: Resumen datos de varianza. _____	- 66 -
Tabla 17: Análisis de varianza. _____	- 66 -
Tabla 18: Resta de los promedios de los tratamientos. _____	- 67 -
Tabla 19: Prueba de Tukey. _____	- 67 -

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: *Evidencias fotográficas durante la elaboración del trabajo de biorremediación* ____ - 79 -

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La palabra suelo se deriva del término latín “Solum” que significa tierra sólida, los primeros estudios científicos del suelo son del siglo XIX en la escuela geográfica rusa, donde se han realizado varios estudios, en los que se reconocía por primera vez que los suelos están formados por varias capas (Cando Rodríguez, 2011).

Aquellos estudios iniciaron el camino hacia una nueva ciencia que se esconde debajo de nuestros pies, pero no ha recibido la importancia que merece. Los primeros estudios que se realizaron fueron los análisis físico químicos descubriendo que están formados por varios minerales, lo que hace diferente un suelo de la superficie que de su interior (Salvador-Adriano et al., 2024).

Las ciencias encargadas de estudiar, este se agrupa bajo el término de ciencias del suelo, entre las que se distingue la Edafología, siendo esta ciencia la más relevante en la composición del suelo, funciones, formación y el entorno que lo rodea (Cando Rodríguez, 2011).

El suelo es un pilar fundamental en donde se sostiene la vida en todas sus formas, como las plantas, animales y los microorganismos. Es importante para el equilibrio de los ecosistemas y a su vez produce alimentos para satisfacer las necesidades de los seres vivos (Bezdicsek et al., 2015).

La contaminación del suelo por diferentes sustancias ha provocado daños en los ecosistemas y seres vivos. Esta contaminación ha sido producida por diferentes causas, como, por ejemplo: la ganadería, minería, agricultura y la industria petrolera. Esta última ha sido una de las actividades que ha ocasionado daños muy graves al ecosistema a causa del derrame de petróleo (Luigui y Paredes, 2022).

El crecimiento de la demanda por hidrocarburos por parte de la sociedad a través de la explotación de este mineral ha provocado la degradación del suelo, no solo en Ecuador, si no en la mayoría de países que realizan estas actividades. Estas prácticas han sido la causa para su deterioro físico, químico y biológico hasta su total destrucción (Vizúete-García et al., 2020).

En la naturaleza, los hidrocarburos son eliminados gradualmente del suelo por procesos de biodegradación, volatilización, percolación y drenaje superficial en donde se necesita un tiempo bastante prolongado que pueden tomar hasta años, por esta razón en los últimos años se ha prestado mucha atención a los métodos biológicos tanto para el tratamiento de residuos industriales como en la recuperación de sitios contaminados (Cando Rodríguez, 2011).

En los últimos años se ha incrementado el uso de tratamientos biológicos como la biotecnología o biorremediación para restaurar suelos contaminados con hidrocarburos, además de la implementación políticas ambientales, se están tomando medidas a disminuir y mitigar los impactos ambientales provocados por la contaminación con hidrocarburos ya que en los últimos años aumentado este problema alrededor del mundo (Alanya de la Cruz y Clemente Huamán, 2022).

La contaminación por hidrocarburos es una problemática de carácter mundial y amplia distribución geográfica, teniendo en cuenta que independiente de la zona afectada (lagos, suelos, zonas freáticas, ríos playas) por procesos biológicos y físicos, los hidrocarburos tienen como destino final los mares y océanos en donde sus afectaciones aumentarían significativamente (Arias y Arias, 2017).

El principio básico de la biorremediación consiste en aumentar la velocidad de degradación natural de los hidrocarburos contaminantes de los suelos, puede ser mediante la mezcla del residuo con la capa superficial del suelo (material orgánico en forma de humus) y abonos orgánicos naturales, los cuales contienen microorganismos facultativos que se adaptan al consumo y degradación de los hidrocarburos (Luigui y Paredes, 2022).

Varias pruebas de laboratorio y sobre el terreno han demostrado que la biorremediación puede ser una tecnología de limpieza rentable para tratar suelos y sedimentos oleosos que contienen hidrocarburos biodegradables y microorganismos autóctonos especializados (Cando Rodríguez, 2011).

La contaminación extensa del suelo con hidrocarburos de petróleo genera entornos extremadamente hostiles para la vida, produce condiciones hidrofóbicas y suelos infértiles provocando la muerte prematura del ecosistema que, en última instancia, conducen a un menor crecimiento de plantas y microbios (Zamora et al., 2012).

La Biorremediación en suelos es empleada para atacar o sustraer agentes contaminantes específicos del suelo, se realiza por medio de degradación o transformación de diferentes compuestos nocivos en otros de menor toxicidad o materia orgánica en descomposición de acuerdo a la investigación de Haghollahi et al. (2016). Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza y una adecuada manipulación de los sistemas bio-lógicos puede aumentar la velocidad de cambio o degradación esto lo podemos hacer incrementando la vida microbiana (Luigui y Paredes, 2022).

La efectividad de la técnica de la biorremediación, ha sido demostrada tanto en entornos controlados como en situaciones reales. Los estudios han evidenciado que la biorremediación puede ser una alternativa rentable y respetuosa del medio ambiente para descontaminar suelos afectados. Esto es especialmente cierto cuando se dispone de microorganismos nativos que están bien adaptados a las condiciones específicas del lugar (Cando Rodríguez, 2011).

La aplicación de compost en el suelo afectado a través de este método se enfocó en aumentar la vida microbiana de esta manera regenerar este suelo disminuyendo la concentración de hidrocarburos, aplicando diferentes concentraciones de compost, los resultados de los análisis serán comparados con las normas de calidad del suelo vigente en el Ecuador.

1.1 Objetivos.

1.1.1 Objetivo general.

Determinar el efecto de la degradación de los hidrocarburos no volátiles por la aplicación de compost para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

1.1.2 Objetivo específico.

- Determinar los niveles de concentración del contaminante mediante la técnica de Soxhlet para establecer una línea base de la experimentación.
- Aplicar 4 tratamientos de una solución de compost mediante diferentes concentraciones para establecer sus efectos en la degradación de hidrocarburos.
- Evaluar la concentración final de hidrocarburos en el suelo e identificar el tratamiento más efectivo en la biorremediación mediante análisis de laboratorio y estadístico.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El suelo

El futuro de la humanidad está vinculado al estado y conservación de los recursos del suelo en la Tierra, dado que, los suelos constituyen la base del ecosistema más complejo y diverso del planeta. Además de proporcionar aproximadamente el 98,8 % de los alimentos que consume la humanidad, desempeñan funciones esenciales como el almacenamiento de carbono, la regulación del ciclo hidrológico, la filtración de contaminantes, y el sustento de la biodiversidad, entre otros servicios ecosistémicos clave, de acuerdo a la investigación de Kopittke et al. (2019). También participan en la regulación de los gases de efecto invernadero hasta la mitigación de inundaciones y el apoyo a nuestras ciudades en expansión (Lehmann et al., 2020).

El suelo permite la agricultura, mejora la calidad del agua y amortigua los gases de efecto invernadero en la atmósfera según la investigación de Hartemink (2016). Sin embargo, las actividades humanas, entre ellas la erosión del suelo agrícola, están acelerando la degradación del suelo a un ritmo que supera con creces su capacidad de regeneración natural (Amundson et al., 2015).

Los suelos se consideran sistemas bioquímicos complejos, multicomponentes y abiertos, que interactúan constantemente con los flujos de masa y energía provenientes de la atmósfera. Esta dinámica biogeoquímica genera un equilibrio delicado y variable en su composición. Como sistema dinámico, el suelo está conformado principalmente por tres componentes: partículas minerales, materia orgánica en descomposición (detritos) y organismos vivos que se alimentan y dependen de estos elementos (Bezdicsek et al., 2015).

Este recurso natural vital e insustituible, que provoca un vínculo esencial entre los componentes (aire, lecho rocoso, agua y biota) siendo una pieza clave que conforma nuestro medio ambiente, estos componentes interactúan entre sí para proporcionar necesidades esenciales como alimentos, combustible, fibra y medicina natural para sustentar al organismo (García Izquierdo et al., 2002).

La edafología tiende a ser una ciencia costosa. Los suelos son extremadamente diversos y es necesario tratarlos de manera específica. Cualquier recomendación debe ajustarse a las condiciones específicas del suelo (García et al., 2012).

2.1.1 Estructura del suelo

El suelo, es un cuerpo natural generalmente de color oscuro, compuesto por materia mineral, predominantemente tierras, materia orgánica, agua y aire que cubre la superficie terrestre. Dentro de sus materiales componentes, el suelo se compone de tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Salvador-Adriano et al., 2024).

La fase sólida está conformada por partículas minerales y materia orgánica, y en ella se manifiestan las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La fase líquida, por su parte, comprende el agua del suelo, en la cual ocurren procesos clave como el transporte y almacenamiento de nutrientes. Finalmente, la fase gaseosa se refiere a los intercambios de gases, especialmente oxígeno y dióxido de carbono, provenientes del aire atmosférico, esenciales para la respiración de raíces y microorganismos (Calderón-Medina et al., 2018).

Los cambios que se producen a nivel biológico son realizados por la flora y la fauna del lugar, donde aproximadamente el 80% de los procesos son dados principalmente por el microbiota, cambios como la degradación, el aporte de materia orgánica, los ciclos biogeoquímicos de elementos, el cambio en estructura y composición del suelo (Burbano-Orjuela, 2016).

La biología del suelo es una ciencia compleja y dinámica, se puede encontrar una gran red extensa de organismos como el microbiota, estos organismos son los principales responsables en producir las propiedades químicas y físicas del suelo al desempeñar un papel elemental en la fragmentación, transformación y translocación de material orgánico (Calderón-Medina et al. 2018).

El suelo tiene su origen de la roca madre, en donde se ha provocado un cambio en la estructura de su composición debido a los factores ambientales, por ende, desarrollan varios procesos que convierten el material original en una morfología y otras propiedades que son modificadas a través del tiempo tal como lo indica Hartemink (2016). En la formación de suelo actúan un conjunto de procesos heterogéneos, a continuación, se mencionan los principales factores que moldean y da formación al suelo según (Burbano-Orjuela, 2016).

- La litología: es la disciplina encargada de estudiar las rocas, dando prioridad a las características físicas del suelo (textura, permeabilidad, consistencia, entre otras) y químicas (riqueza en nutrientes, acidez, etc.). Las rocas que contienen abundantes minerales inestables se transforman fácilmente en los suelos, las arenas maduras contienen minerales muy estables y mientras tanto el cuarzo apenas llega a edificarse pese a que está expuesto a largo tiempo a la meteorización.
- El clima: influye en la formación del suelo (humedad y temperatura) y también ejerce una alteración química del suelo, controla los procesos y su intensidad en el entorno.
- El relieve: influye directamente sobre el transporte por gravedad. Por otra parte, los relieves abruptos ayudan en la erosión, originándose suelos lépticos y pocos profundos. Además, hay aspectos como la insolación, drenaje del suelo y procesos geomorfológicos que también influyen en la formación del suelo.
- Los seres vivos: en la mayoría afectan al suelo de varias maneras, tanto positivas como negativas. Las plantas son la fuente principal de materia orgánica del suelo la cual cumplen la función de mantener un suelo saludable convirtiendo la materia orgánica (hojas, plantas) en estado de descomposición en manto orgánico protector del suelo de la superficie.

2.1.2 Granulometría del suelo

El análisis granulométrico es un procedimiento de laboratorio que se utiliza para determinar y clasificar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de suelo y proporciona información crucial sobre las propiedades físicas del suelo, como su textura, estructura y capacidad de retención de agua, que son importantes para varios usos, como la agricultura, la ingeniería civil y la geotecnia de acuerdo a la investigación de Rodríguez (2023). El análisis granulométrico clasifica las partículas del suelo en diferentes franjas de tamaño a través de un conjunto de operaciones, por lo que, los suelos pueden dividirse en:

- Partículas gruesas: Pedazos de roca o gravas que son mayores a 2 mm.
- Arena: Partículas que tienen un tamaño entre 0,05 mm y 2 mm.
- Limo: Partículas más finas, entre 0,002 mm y 0,05 mm.
- Arcilla: Partículas más pequeñas que 0,002 mm.

Mediante la aplicación granulométrica se puede obtener información importante como: su origen, propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia aplicado a cada uno de los granos según su tamaño dentro de la escala granulométrica, la cual se usa para clasificar los diámetros por tamaños de las partículas de un árido y que son separadas mediante tamices.

2.1.3 Funciones del suelo

El suelo, cumple tres funciones fundamentales para el sustento y desarrollo de la vida siendo un pilar importante e irremplazable.

- Recurso natural: es el sustrato de una amplia variedad de plantas, animales y microorganismos, resulta básico para la producción primaria de los ecosistemas terrestres, siendo el factor de productividad primario por excelencia (Cando Rodríguez, 2011). Se considera como un recurso social, dado que permite realizar distintas actividades agrarias, forestales, además de proporcionar biodiversidad y variedad paisajística (Calderón-Medina et al., 2018).
- Soporte de vida: Es un sistema complejo en el que interaccionan materiales orgánicos, agua, vegetales, fauna animal y multitud de microorganismos en evolución, cambio y regulación continua.
- Receptor de efluentes. Ejerce un papel de tapón, comportándose como filtro y elemento transformador entre la atmósfera y la capa freática, permite retener y procesar los contaminantes que lleguen a él evitando su paso directo al agua, al ecosistema o al hombre (Cando Rodríguez, 2011).

2.1.4 Características físicas del suelo

Las características físicas del suelo incluyen la textura, la estructura, la consistencia, la porosidad, la densidad aparente, la fácil filtración del agua el color y la humedad (Haghollahi et al., 2016).

Estos parámetros sirven de indicadores de las características del suelo, estableciendo el flujo de agua, la estructura, densidad, la capacidad de infiltración y la conductividad, además de ser un indicador de su calidad (Calderón-Medina et al., 2018).

- Color: Es una de las características físicas más notorias, nos sirve para reconocer y describir los diferentes tipos de suelos, además de establecer el transcurso de los diferentes grupos genéticos. El tono es uno de los atributos más útiles para describir y caracterizar el suelo, depende de sus componentes y varía con los contenidos de humedad (Burbano-Orjuela, 2016)
- La textura del suelo: se basa en la forma de cómo se asocian sus partículas de arena, arcilla y limo para formar agregados, las cuales están conectadas y situadas entre sí definiendo su configuración física, permitiendo en menor o mayor grado el transporte de agua y aire Pastor Mogollón et al. (2016). Dependiendo de la proporción de las partículas fundamentales del suelo, se determina mediante mecanismos de separación de partículas conocidos como método Bouyoucos, la magnitud se rige por la textura siendo una de las principales características en la preparación mecánica de los suelos, factores como permeabilidad, fertilidad, retención de humedad, drenaje y riego, son parte fundamental de la productividad y capacidad del suelo, la textura está determinada por el tamaño de las partículas que conforman el suelo, la proporción en que se distribuyen, y se dividen en arena, limo y arcilla (García et al., 2012).

En la figura 1, se observa la pirámide de texturas de suelo.

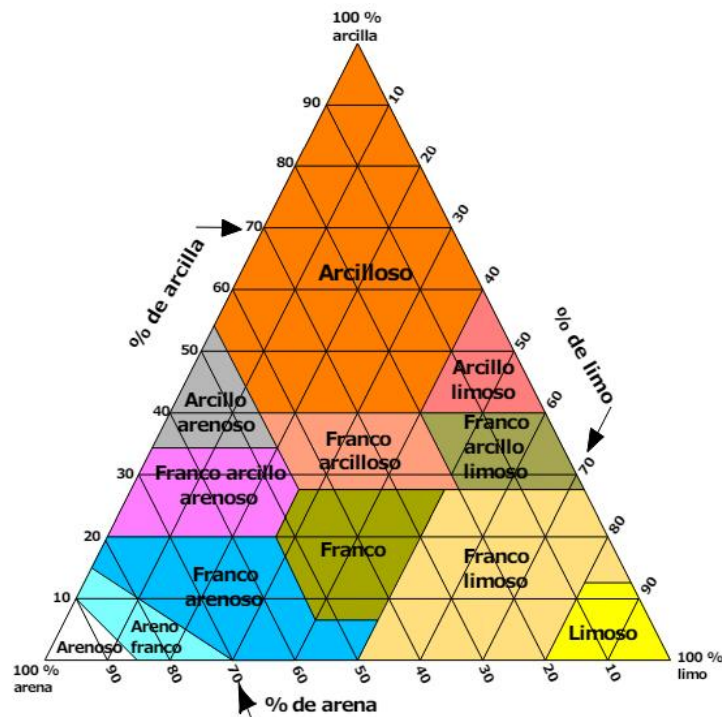


Figura 1: Pirámide de las diferentes texturas del suelo.

Fuente:(Pastor Mogollón et al., 2016).

Las principales texturas del suelo son:

- Suelo de textura limosa: son aquellos que presentan un tamaño intermedio formándose de arenas y arcillas, de menos del 35 al 40% de arcilla y menos del 50% de arena, se caracterizan por una alta proporción de poros de tamaño medio a fino, con buena aireación y drenaje tienen una mayor capacidad de retención de nutrientes, son suelos más equilibrados, con buena textura y fertilidad (Gabriels y L, 2006).
- Suelo de textura arenosa: son aquellos en el que el contenido de limo y arcilla no sobrepasa el 20%, en general no tienen una buena estructura, son suelos sueltos de poca cohesión, escasa capacidad de retención de agua, propensos a la desecación y fáciles de trabajar (Arias y Arias, 2017).
- Suelo de textura arcilloso: poseen una gran superficie por unidad de masa, son las más activas para la retención de nutrientes y humedad, presentan más del 50% de arcilla, son suelos plásticos, fuertes y adhesivos difícilmente (Gabriels y L, 2006).

Otras características físicas del suelo son:

La estructura del suelo hace referencia a la organización que poseen las diferentes partículas que conforman un suelo en agregados estables, lo que influye a la facilidad de la aeración de las partículas del suelo en agregados estables, lo que influye en la aireación el movimiento del agua, la conducción de calor y el desarrollo de las plantas (Mogollón et al., 2010).

La consistencia se refiere a la deformación y depende de mayor medida del contenido de agua del suelo, lo que determina el momento oportuno de labranza y permite estimular la humedad del suelo mediante el tacto mientras que la porosidad del suelo se refiere a la cantidad de espacio existente entre las partículas, lo que afecta la circulación del aire y el almacenamiento de agua (García et al., 2012).

- La densidad aparente del suelo se refiere a la masa por unidad de volumen, lo que influya en la capacidad de retención de agua y aireación del suelo, la cual determina el estado físico del suelo reflejando el comportamiento dinámico y porosidad de la estructura. Nos ayuda a conocer el grado de dureza del suelo, textura y porosidad Calderón-Medina et al. (2018). La densidad aparente es definida como la masa del suelo por unidad de volumen, representando el espacio entre lo sólido y lo poroso, además, de evaluar la propiedad de firmeza del suelo en la elongación de raíces (García et al., 2012).
- La infiltración del agua se refiere a la entrada del agua, lo que indica la capacidad del suelo para poder permitir el movimiento del agua y aireación del suelo.
- El color del suelo afecta la temperatura y la humedad, y puede indicar su composición y las condiciones a las que son sometidas.

- La humedad es la cantidad del agua contenida en el suelo, lo que actúa como el transportador de nutrientes para las plantas y contribuye a la regulación de la temperatura del suelo.
- La compactación del suelo se refiere a la densidad aparente o la disminución en la porosidad del suelo, siendo afectadas las funciones del suelo y dificulta la penetración de las raíces y el intercambio de Características químicas.
- Las características químicas del suelo incluyen propiedades tales como el pH, la capacidad de intercambio de cationes (CIC), la presencia de macro y micronutrientes, la salinidad, la conductividad eléctrica, la presencia de materia orgánica y la concentración de elementos tóxicos.
- El pH del suelo es una medida de su acidez o alcalinidad, influye principalmente en la disponibilidad de los nutrientes que necesita la plantas, toxicidad, actividad microbiana e incluso en la estructura del suelo.
- La CIC del suelo hace referencia a la capacidad que este posee para retener y liberar cationes, lo que influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas. La presencia de macro y micronutrientes en el suelo es primordial para el desarrollo de las plantas, y su disponibilidad esta influenciada por factores como el pH y la CIC.
- La salinidad se refiere al contenido de sales disueltas en el suelo, lo que puede afectar negativamente al desarrollo de las plantas.
- La conductividad eléctrica del suelo es una medida de la capacidad que posee para conducir la corriente eléctrica la cual está relacionado con la salinidad.
- La presencia de materia orgánica en el suelo es importante por las siguientes funciones para su fertilidad, estructura y capacidad de retención del agua.
- La concentración de elementos tóxicos en el suelo puede afectar negativamente como el desarrollo de las plantas, la infertilidad del suelo y la salud humana.

Estas características químicas del suelo son fundamentales para comprender su capacidad para soportar la vida vegetal y su idoneidad para diferentes usos, como la agricultura, la silvicultura y la restauración de ecosistemas, agua y gases.

2.1.5 Características químicas del suelo

Las características químicas del suelo incluyen propiedades tales como el pH, la capacidad de intercambio de cationes (CIC), la presencia de macro y micronutrientes, la salinidad, la conductividad eléctrica, la presencia de materia orgánica y la concentración de elementos tóxicos (Calderón-Medina et al., 2018). Las principales características químicas son:

- El pH del suelo es una medida de su acidez o alcalinidad, influye principalmente en la disponibilidad de los nutrientes que necesita la plantas, toxicidad, actividad microbiana e incluso en la estructura del suelo.
- La CIC del suelo hace referencia a la capacidad que este posee para retener y liberar cationes, lo que influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas. La

presencia de macro y micronutrientes en el suelo es primordial para el desarrollo de las plantas, y su disponibilidad está influenciada por factores como el pH y la CIC.

- La salinidad se refiere al contenido de sales disueltas en el suelo, lo que puede afectar negativamente al desarrollo de las plantas.
- La conductividad eléctrica del suelo, es una medida de la capacidad que posee para conducir la corriente eléctrica la cual está relacionado con la salinidad.
- La presencia de materia orgánica en el suelo, es importante por las siguientes funciones para su fertilidad, estructura y capacidad de retención del agua.
- La concentración de elementos tóxicos en el suelo puede afectar negativamente como el desarrollo de las plantas, la infertilidad del suelo y la salud humana.

Estas características químicas del suelo son fundamentales para comprender su capacidad para soportar la vida vegetal y su idoneidad para diferentes usos, como la agricultura, la silvicultura y la restauración de ecosistemas (Burbano-Orjuela, 2016).

2.1.6 Características biológicas del suelo

Las características biológicas del suelo se refieren a la presencia de organismos vivos en el suelo. De acuerdo con la FAO (2020) las características biológicas con más importancia del suelo incluyen vida:

- Microorganismos: son esenciales para la salud del suelo e incluyen bacterias, hongos, actinomicetos y otros microorganismos que realizan las funciones de descomponer materia orgánica, fijar nutrientes y participan en ciclos biogeoquímicos clave.
- Hongos descomponedores desempeñan un papel importante en los ecosistemas una de ellas es descomponer la materia orgánica del suelo. Otra función importante es que algunos hongos forman asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, como las micorrizas que mejoran la absorción de nutrientes.
- Raíces de las plantas: No solo fijan a las plantas al suelo, sino que también liberan compuestos orgánicos que sirven de alimento para diversos microorganismos, como las *rizobacterias*. Estas bacterias habitan en la rizosfera, a zona del suelo estrechamente asociada a las raíces y contribuyen activamente a mejorar la estructura del suelo, además de favorecer la absorción de nutrientes por las plantas.
- Materia orgánica: Es un componente biológico fundamental del suelo que contribuye significativamente a su fertilidad y a la proliferación de nuevas plantas. La descomposición de residuos vegetales y animales, llevada a cabo por microorganismos y otros descomponedores, libera nutrientes en formas que las plantas pueden asimilar fácilmente, favoreciendo así el crecimiento vegetal.
- Ciclos biogeoquímicos: son esenciales para el desarrollo de plantas e incluyen el ciclo del nitrógeno, el ciclo del carbono y el ciclo del fósforo, son procesos biológicos que

involucran a organismos del suelo en la transformación y disponibilidad de nutrientes esenciales.

- Actividad enzimática: los microorganismos en el suelo producen enzimas que descomponen sustancias orgánicas en formas más simples. La actividad enzimática es un indicador de la salud del suelo y su capacidad para sostener la vida.

2.1.7 Importancia del suelo

El suelo es un recurso natural crucial e irremplazable que desempeña un papel fundamental en varios aspectos de la vida en la tierra. Su importancia se manifiesta en múltiples formas esenciales (Calderón-Medina et al., 2018). Los principales aspectos relevantes relacionados con el suelo son:

- Soporte de la vida vegetal: proporciona un medio en el cual las plantas pueden crecer y desarrollarse. Es esencial para la producción de alimentos, dado que la mayoría de los cultivos son producidos en el suelo.
- Ciclo de nutrientes: el suelo actúa como un reservorio en donde acumula nutrientes esenciales para las plantas, como: nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes son fundamentales para el crecimiento y el desarrollo de las plantas y a su vez es la base para la cadena alimentaria.
- Filtración y purificación del agua: debido a su porosidad tiene la capacidad de filtrar y purificar el agua a medida que esta se mueva a través de él manteniéndose limpias. Esto ayuda a que estos elementos se mantengan saludables la capacidad del agua subterránea y evita la contaminación de las fuentes de agua.
- Hábitat para organismos: el suelo alberga una diversidad de organismos, desde microorganismos hasta insectos y pequeños vertebrados que a través de sus funciones regeneran el suelo.
- Almacenamiento de carbono: los suelos juegan un factor importante en el ciclo. Actúan como un almacén del carbono orgánico, ayudando a regular manteniendo un equilibrio de los gases de efecto invernadero en la atmósfera y contribuyendo a la mitigación del cambio climático.
- Soporte para infraestructuras: proporciona una base sólida para sostener edificaciones e infraestructuras. Su capacidad para soportar grandes pesos es crucial para la construcción de carreteras, edificación y otras estructuras.
- Biodiversidad: los diferentes tipos de suelo albergan una amplia variedad de flora y fauna. La diversidad biológica en el suelo contribuye a la regeneración, a la salud y a la resiliencia de los ecosistemas terrestres.
- Reciclaje de desechos: los microorganismos en el suelo participan en la descomposición de residuos orgánicos, contribuyendo al reciclaje de materiales y a la generación de nutrientes para el ciclo biogeoquímicos.
- Estabilidad de laderas y control de la erosión: la cobertura vegetal junto con sus raíces ayuda a estabilizar laderas y reduce la erosión del suelo. Esto es importante para

prevenir deslizamientos de tierra, reduce la pérdida de nitrógeno y pérdida de suelo fértil.

- Estética y recreación: Los suelos bien tratados también contribuyen a la estética del paisaje y proporcionan áreas para actividades recreativas al aire libre.

2.1.8 Contaminación del suelo

En el mundo existen decenas de millones de sitios con suelo contaminado y, con el aumento de la población y los riesgos asociados, existe una presión cada vez mayor para remediarlos. Los contaminantes del suelo incluyen una amplia gama de compuestos metálicos y orgánicos y minerales naturales y sintéticos, lo que hace que los costos analíticos sean potencialmente muy altos (Horta et al., 2015).

La contaminación del suelo es un problema ambiental significativo que requiere una atención urgente a nivel mundial. Según el informe especial sobre el suelo y el cambio climático de la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura de acuerdo al estudio de Becerra et al. (2013). La contaminación del suelo se ha considerado como una de las principales causas que amenazan el bienestar de los ecosistemas y recursos en el mundo.

Los metales pesados son constituyentes naturales de los suelos y su concentración varía según los materiales parentales que se encuentren. En los últimos años, el contenido de metales pesados en los suelos se ha elevado debido a actividades humanas tales como: distribución de fertilizantes, pesticidas, industrias, eliminación de desechos y contaminación del aire en función del estudio de García Izquierdo et al. (2002). Debido a estas actividades la capacidad vital de los suelos disminuyó, especialmente cuando el fondo natural ya es alto debido a la riqueza en metales pesados del material parental natural a partir de la investigación de Barbieri (2017). Esta problemática atrae consecuencias para la salud humana y la seguridad alimentaria por el hecho que se puede contaminar las aguas subterráneas y superficiales.

Entre algunas de las principales causas de contaminación del suelo se mencionan actividades como la industria, la minería, la mala gestión de desechos, la agricultura la ganadería y la construcción de infraestructuras urbanas y de transporte (Gabriela Pérez Naranjo et al., 2015).

Conocer las causas de la contaminación de los suelos permiten establecer planes de manejo de esta manera regular las actividades que generen impactos sobre este recurso; además facilita la selección y delimitación de métodos para la restauración en caso de que la contaminación o degradación ya se haya presentado basado en el estudio de Bustamante Cabrera y Silva Ora (2019). Así mismo conocer el tipo de contaminante es fundamental, dado que, a partir de esta información, y bajo diferentes criterios técnicos, es posible seleccionar los tratamientos más eficientes para la recuperación de suelos afectados.

2.1.9 Tipos de contaminación del suelo

Estos contaminantes pueden ser físicos, químicos y biológicos. Presentes en el ambiente y alteran el equilibrio de los ecosistemas de manera negativa ocasionando daños a la salud de los seres humanos, al entorno natural, la vida animal y vegetal ocasionando la destrucción total de los ecosistemas, además de contribuir al cambio climático (Torres Ordóñez, 2019).

El deterioro del entorno natural ocurre debido a la introducción de diversos tipos la energía, seres vivos o compuestos químicos, lo cual influye de manera adversa en las particularidades de los ecosistemas y altera su habilidad para procesar o descomponer estas sustancias de una manera natural según el estudio de Arias y Arias (2017). Esta introducción de elementos contaminantes es resultado tanto de las acciones humanas conocidas como actividades antropogénicas, como procesos naturales. En términos generales, estos contaminantes se pueden categorizar de la siguiente manera (Rosales Aranda, 2013).

Contaminantes orgánicos: estos son aquellos que abarcan una variedad de compuestos, como: hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), PCBs, dioxinas, hidrocarburos derivados del petróleo, solventes clorados, sustancias aromáticas utilizadas en la fabricación de tintes, explosivos, productos farmacéuticos, pesticidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), surfactantes, entre otros según la investigación de Valentín et al. (2013). En comparación con los compuestos inorgánicos, estos contaminantes poseen una menor toxicidad para las plantas debido a su menor reactividad y su capacidad de acumularse en cantidades más reducidas.

Contaminantes inorgánicos: son elementos como los metales pesados, como el cobalto (Co), cromo (Cr), o cobre (Cu), así como elementos no metálicos como el arsénico (As), y el boro (B), entre otros (Reyes et al., 2016).

2.2 Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos que formados por una mezcla compleja de átomos de hidrogeno con átomos de carbono, por ejemplo 86% y 14% respectivamente, pero también pueden contener compuestos como azufre, nitrógeno y oxígeno. Estos compuestos se pueden clasificar de acuerdo a su cadena carbonada y sus enlaces (Tanya et al., 2018).

En la figura 2 se observa la figura del alcanos.

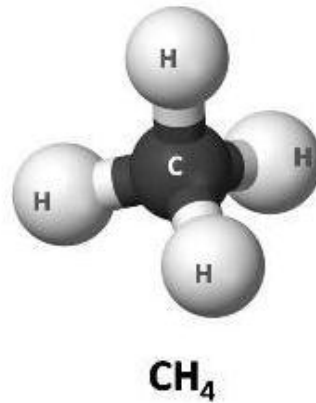


Figura 2: Estructura del alcano.

Fuente: (Acuña et al., 2010).

2.2.1 Tipos de hidrocarburos

Los crudos que contienen en su estructura mayores grados API se consideran livianos, tienen porcentajes bajos de carbono, alto contenido de hidrógeno y son ricos en parafinas, mientras que los crudos pesados poseen un bajo contenido de carbono e hidrógeno y son ricos en compuestos aromáticos de acuerdo Acuña et al. (2010). Los crudos livianos poseen una mayor cantidad de componentes volátiles que entran a través de las plantas afectando sus células, los hidrocarburos pesados por el contrario resultan menos tóxicos (Hernández Valencia et al., 2017). En la tabla 1 se muestra la clasificación del crudo por número API y densidades.

Tabla 1: Clasificación del crudo por número API y densidades.

Tipo de crudo.	°API.	Densidad.
Liviano	>31,1 y más	<870
mediano	22,3-31,1	920-870
Pesado	10,0-22,3	1000-920
Extra pesado	<10	>1000

Fuente: (Cortés Llerena, 2017)

Los hidrocarburos a su vez se clasifican en:

Los alifáticos se pueden clasificar en alcanos, alquenos y alquinos según los tipos de enlace que poseen para unir entre sí los átomos de carbono. Las fórmulas generales de los alcanos, alquenos y alquinos son C_nH_{2n+2} , C_nH_{2n} y C_nH_{2n-2} , respectivamente (Acuña et al., 2010).

Los hidrocarburos aromáticos, son aquellos que poseen las propiedades especiales que están asociadas con el núcleo o anillo del benceno, en el cual existen seis grupos de carbono-hidrógeno unidos a cada uno de los vértices de un hexágono. Los enlaces que unen estos seis grupos al anillo presentan características intermedias, respecto a su comportamiento, entre los enlaces simples y los dobles Reyes et al. (2016). Los hidrocarburos aromáticos contienen anillos de átomos de carbono con hibridación sp^2 , estando los orbitales p z implicados en enlaces π que se estabilizan por deslocalización orbital y, además, por resonancia tal como indica el estudio de Pons-Jiménez

et al. (2011). El número de electrones π necesarios para formar una estructura aromática es $2n + 4$ (regla de Hückel). Los hidrocarburos aromáticos muestran una alta estabilidad térmica de los anillos aromáticos (Acuña et al., 2010).

Los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se pueden clasificar en dos categorías, la primera son los compuestos de la gama de gasolina que se componen en su mayoría de alcanos de cadena corta (C6-C10) y compuestos volátiles; y en el segundo grupo encontramos los compuestos orgánicos de clase diésel que son de cadena larga (C10-C40), donde se puede encontrar compuestos hidrófobos como aromáticos policíclicos (Pons-Jiménez et al., 2011).

La contaminación por TPH sucede cuando la cantidad de hidrocarburo es superior a la capacidad que tienen los microorganismos autóctonos del lugar de degradarlos en sustancias inocuas, estas fracciones que no se degradan se adhieren al suelo y permanecen por un tiempo indeterminado (Tanya et al., 2018).

Petróleo crudo: La mayor parte de los hidrocarburos que son extraídos en la región son petróleo crudo siendo una compleja mezcla de diferentes compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno). En la Amazonía ecuatoriana, el petróleo es generalmente de tipo liviano, lo que significa que tiene un bajo contenido de azufre y es relativamente fácil de refinar (Rojas Jaramillo, 2015).

2.2.2 Hidrocarburos volátiles y no volatines

El petróleo de la Amazonía ecuatoriana, al igual que otros tipos de crudo, tiene una composición variada que incluye tanto hidrocarburos volátiles (ligeros) como no volátiles (pesados). La proporción de cada uno depende de la cuenca de extracción y de las características geológicas del yacimiento.

Hidrocarburos volátiles: son aquellos que se evaporan a temperaturas relativamente bajas. Generalmente son ligeros, por su bajo peso molecular, y se caracterizan por su capacidad de ser fácilmente gaseosos a temperatura ambiente o a temperaturas moderadas (Pons-Jiménez et al., 2011). Este grupo incluye:

- Metano (CH_4)
- Etano (C_2H_6)
- Propano (C_3H_8)
- Butanos y otros gases ligeros.

Este tipo de hidrocarburos volátiles se encuentran en una mayor proporción en los crudos ligeros y superficiales de la Amazonía, que suelen tener una mayor cantidad de fracciones volátiles.

Proporción de hidrocarburos volátiles: En el petróleo amazónico de Ecuador, los crudos más ligeros pueden poseer un 15% a 30% de hidrocarburos volátiles en su composición, aunque este porcentaje puede variar según la ubicación del yacimiento específico (Reyes et al., 2016).

Los hidrocarburos no volátiles son más pesados por lo cual su peso molecular es mayor. Son menos volátiles y suelen permanecer en forma líquida a temperaturas ambientales. Estos incluyen:

- Aceites pesados o fracciones de asfáltenos.
- Parafinas de alto punto de fusión.
- Naftenos y aromáticos.

El contenido de estos hidrocarburos no volátiles es más elevado en los crudos pesados, y se requiere más energía para su refinación. Los crudos amazónicos que son clasificados como "medios" o "pesados" pueden tener una proporción de hidrocarburos no volátiles de 70% y el 85% (Song et al., 2023).

2.3 Contaminación a causa de derrames de hidrocarburos

Los derrames de hidrocarburos pueden provocar una amplia variedad de impactos en la tierra como en el medio marino y con frecuencia se presentan en los medios de comunicación como "desastres medioambientales", con predicciones de consecuencias fatales consecuencias para la supervivencia de la fauna y flora marina a base del estudio de Arias y Arias (2017). En muchos casos, las actividades de remediación no son ejecutadas por las mismas empresas que causan la contaminación, lo que puede resultar en una contaminación que dure años o incluso décadas (Hernández Valencia et al., 2017). Si no se aplican tecnologías adecuadas para recuperar estos suelos, podría perderse de forma permanente.

Un derrame de petróleo se define como la descarga (intencionada, accidental o por prácticas laborales incorrectas) de hidrocarburos al medio ambiente de acuerdo al estudio de Zamora et al. (2012). Los derrames de petróleo son una fuente importante de contaminación, ya que pueden propagarse rápidamente, dependiendo del tipo de hidrocarburos y de las condiciones topográficas y climatológicas de la zona, base a la investigación de Mayorga-Mayorga et al. (2022) Los efectos producidos por un derrame pueden ser persistentes en el tiempo, poniendo en riesgo la vida de humanos y especies.

Estos eventos provocan una grave afectación en el suelo, poniendo en riesgo la flora, fauna y microorganismos presentes, lo que reduce su fertilidad y crecimiento de las plantas, así como la sobrevivencia de los animales. Además, representa un peligro directo para las personas que habitan dentro de su área de influencia, ya que impacta su salud, sistemas de producción y estilo de vida (Cavazos-Arroyo et al. 2014). Los derrames y descargas de residuos sólidos y líquidos provocados por la industria petrolera en Ecuador han resultado en la presencia de contaminantes con alto contenido de hidrocarburos (PAHs y BTEX) y elementos metálicos (sales), los cuales se caracterizan por sus efectos agudos y/o crónicos de toxicidad (Calderón-Medina et al., 2018).

2.4 Beneficios económicos de la explotación petrolera en Ecuador

Desde el descubrimiento del petróleo en Ecuador hasta la última década, este recurso ha representado la principal fuente generadora de divisas para el país, constituyéndose en un componente sustancial de los ingresos del Estado en función del estudio de Cevallos Aguilar (2013). Los beneficios económicos que genera la explotación petrolera para el Estado ecuatoriano son los siguientes (Tenecota Quezada et al., 2024).

- Fuente de Ingresos para el Estado: El petróleo es la principal fuente de exportación y contribuye con aproximadamente el 30% de los ingresos fiscales del país. Además, es una de las principales fuentes de divisas extranjeras.
- Generación de empleo: La industria petrolera también ha generado miles de empleos directos e indirectos, especialmente en las regiones amazónicas, donde se encuentran las principales áreas de explotación.
- Inversiones en Infraestructura: Los ingresos generados por el petróleo han permitido al gobierno financiar proyectos de infraestructura, como carreteras, hospitales, y escuelas, mejorando las condiciones de vida en algunas áreas del país.

2.5 Impactos ambientales de la explotación petrolera en Ecuador

Las pérdidas de flora y fauna ocasionadas por los derrames de grandes cantidades de petróleo sobre la rica biodiversidad del Ecuador evidencian que muchos de estos actos, atribuidos a sabotajes, pueden interpretarse como verdaderos atentados contra el futuro del país Gabriela Pérez Naranjo et al. (2015). Ecuador es considerado actualmente una de las diez “áreas calientes” del mundo, es decir, regiones con alta biodiversidad, pero también con gran vulnerabilidad ambiental debido a la intervención humana y a la deficiente gestión de las empresas petroleras durante la extracción y transporte del crudo (Paspuel Revelo Lenin, 2002).

En lo que respecta a la fauna, se han visto afectadas especies nativas como el cusumbo andino, el venado chonta, diversas especies de gallos silvestres y anfibios, de acuerdo con lo establecido en el Plan de Manejo del Área Protegida. Entre los principales contaminantes del suelo derivados de la actividad petrolera se encuentran el petróleo crudo y el gas natural, ambos compuestos pertenecientes al grupo de hidrocarburos. La presencia de estos contaminantes ha generado una gran cantidad de suelos degradados, los cuales requieren urgentemente la implementación de nuevas tecnologías de remediación que permitan reducir su impacto (Bustamante Cabrera y Silva Ora, 2019).

Los suelos contaminados con hidrocarburos representan un riesgo significativo para la salud humana, ya que el derrame de estos compuestos altera las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, comprometiendo su calidad y provocando un deterioro ambiental que, a su vez, genera conflictos sociales en las comunidades afectadas. La mayor frecuencia de derrames de petróleo en Ecuador se ha registrado en las cercanías de las ciudades de Coca y Lago Agrio,

particularmente en los campos petrolíferos de Shushufindi, Sacha y Lago Agrio (Ferreira et al., 2013).

Estos campos se ubican cerca de las cuencas de los ríos Aguarico y Napo, que conectan directamente con dos de las áreas protegidas más importantes de la Amazonía ecuatoriana: los Parques Nacionales Cuyabeno y Yasuní, los cuales no solo son refugios de una biodiversidad única, sino que también albergan a comunidades indígenas como los Cofán, Waorani y Ai'cofan, cuyos territorios ancestrales se han visto seriamente amenazados. En particular, el Parque Nacional Yasuní ha sido reconocido por la UNESCO como Reserva de la Biosfera, lo que refuerza la urgencia de proteger estos ecosistemas frente a los impactos de la actividad petrolera (Rivera-Parra et al., 2020).

La propagación del petróleo y sus efectos biológicos se documentan inmediatamente al contacto con el ambiente. Plantas forestales, hierbas de río, algas e invertebrados asociados fueron cubiertos por el petróleo y poco después murieron. La muerte de delfines, nutrias y varias especies de aves debido a la contaminación por petróleo (Hugo y Mijanur, 2016).

En la actualidad, existe un creciente interés por abordar la contaminación del suelo con hidrocarburos, especialmente por parte de los países dedicados a la explotación petrolera, así como de organizaciones e instituciones comprometidas con la protección del medio ambiente. Esta preocupación se debe a los riesgos directos que dicha contaminación representa para la salud humana y los ecosistemas, así como a los elevados costos asociados a los procesos de limpieza, recuperación y mitigación de los sitios afectados (Cando Rodríguez, 2011).

2.6 Contaminación de suelo por derrames de petróleo en Ecuador

Ecuador posee una gran diversidad biológica, siendo uno de los países más megadiversos, por el hecho que posee un alto grado de endemismo de especies y una variedad de ecosistemas y recursos genéticos que lo define como un país megadiverso (Bendix et al., 2010).

Debido a su alta importancia ecológica en el contexto mundial y a la necesidad del aprovechamiento de los recursos naturales en nuestra economía, se requiere la implementación de un marco institucional y jurídico adecuado, además que promuevan explotación sustentable de los mismos (Torres Ordóñez, 2019).

Por el alto grado de importancia ecológica que posee representa en el contexto mundial y por la necesidad del aprovechamiento de los recursos naturales en nuestra economía, es esencial implementar de un marco institucional y jurídico adecuado; de igual manera implementar proyectos que promuevan la explotación responsable y sustentable de los mismos (Mayorga-Mayorga et al., 2022).

La explotación petrolera se inició en Ecuador en el Bloque Gustavo Galindo Velasco conocido como Campo Ancón en 1911. Desde ese año esta industria ha crecido y se ha convertido en la principal fuente de ingresos económicos para el país. En la actualidad, la falta de liquidez generada

por los bajos precios de los hidrocarburos a nivel internacional, pone en evidencia la dependencia de nuestra economía al aprovechamiento de este recurso, a través de esta industria se ha contribuido significativamente al Producto Interno Bruto (PIB), las exportaciones y la inversión pública.

2.7 Impactos de hidrocarburos en el suelo

El hidrocarburo genera en el suelo efectos negativos que ocasionan cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Estos cambios son el resultado del proceso de meteorización que inicia cuando el hidrocarburo toca el suelo y puede seguir indefinidamente, ya que el hidrocarburo no queda solo en la superficie, sino que se filtra hacia las capas más profundas produciendo una separación de los constituyentes del suelo y subsuelo (Cortés Llerena, 2017).

Los minerales tóxicos que genera el hidrocarburo en el suelo conducen a un deterioro en su estructura, pérdida considerable de materia orgánica y pérdida de nutrientes como el potasio, sodio, sulfatos, nitratos y fosfatos, por lo cual el suelo es expuesto a lixiviación y erosión. Así mismo los contaminantes hacen que el suelo pierda fertilidad, haya bajo rendimiento en las cosechas y consecuencias perjudiciales para los humanos y los ecosistemas (Tanya et al., 2018).

Algunas de las propiedades químicas del suelo que son afectadas es la disminución de pH, puesto que ocurre una gran acumulación de carbono orgánico, se generan ácidos por el aumento de los minerales tóxicos acelerando la degradación de acuerdo a Finer et al. (2017) La temperatura, humedad y oxígeno cambian debido a que el petróleo consume oxígeno y aumenta la demanda bioquímica de agua provocando un suelo seco (Cortés Llerena, 2017).

El uso de esta fuente energética no renovable como es el petróleo siendo de las principales fuentes económicas de un país, las actividades de extracción y la movilización se ha convertido en las causas principales de contaminación al suelo por petróleo o sus derivados ya sea por fallas mecánicas, humanas o rupturas a lo largo del tramo de los oleoductos cuando es transportado.

Un vertido menor en el momento de una estación del año equivocado y en un entorno puede resultar mucho más perjudicial que un vertido mayor en otro momento del año en otro o incluso en el mismo entorno los pequeños vertidos pueden tener efectos muy grandes (Hugo y Mijanur, 2016).

El petróleo crudo siempre tiene importantes efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres, en ocasiones, provoca transformaciones de la composición química del medio ambiente y la alteración de sus propiedades físicas que conducen a la destrucción capital nutritivo de la biomasa forestal que es tan perjudicial para la salud humana y así como para el equilibrio del medio biológico (Mayorga-Mayorga et al., 2022).

2.8 Remediación de suelos contaminados

Los métodos aplicados para mejorar las características que han sido modificadas a causa de los contaminantes en el cual se restaura la utilidad de un terreno de acuerdo a la investigación de Molano y Tapia (2023). En términos más específicos existen dos enfoques para llevar a cabo este proceso para la obtención estas tecnologías de la estabilización.

Existen avances significativos en la regulación de la contaminación del suelo, con un desarrollo paralelo de metodologías para la evaluación y remediación del suelo. Elegir un método de remediación de suelos y sedimentos más apropiado depende de gran medida las características presentes del sitio, la concentración, el tipo de contaminantes a eliminar y el uso final del medio contaminado (Sheoran et al., 2008).

Estas tecnologías de estabilización también conocidas como contención, buscan los métodos para disminuir la movilidad y la disponibilidad de los contaminantes en el suelo. Tanto la limpieza como la disponibilidad de suelos pueden llevarse a cabo en el mismo lugar donde se encuentra el suelo contaminado (in situ) o fuera de él siendo esta (ex situ) y pueden ser procesos físicos, químicos y biológicos (Arias y Arias, 2017).

Si bien, existen diferentes técnicas de remediación de suelos que emplean diferentes mecanismos ya sean físicos o químicos, se considera una de las técnicas más sencillas y que menor impacto genera sobre el medio es la biorremediación esta se basa en el uso de organismos vivos sean plantas, hongos o bacterias, para la degradación de contaminantes (Yagual Barzola, 2020).

Estos son métodos de remediación de bajo presupuesto y eficientes, que ahora se están convirtiendo en una parte integral de toda la tecnología ambiental y de recursos biológicos (Sharma et al., 2018).

Hoy en día existe una gran variedad de métodos utilizados para evaluar la contaminación del suelo. Para evaluar el grado de contaminación del suelo se pueden aplicar diferentes índices como el factor de enriquecimiento (EF) y el índice de geo acumulación (Igeo). Estos índices son utilizados para evaluar la presencia e intensidad de la deposición de contaminantes antropogénicos en la superficie del suelo (Barbieri, 2017).

2.8.1 Tipos de tecnologías de remediación de suelos contaminados

En la actualidad se disponen de tres tecnologías de remediación de suelos contaminados, las cuales se describen a continuación (Tarazona-Ocampo et al., 2020).

- **Biológicos.** (Biorremediación, Bioestimulación, Fitorremediación, biolabranza, etc.), las actividades metabólicas de ciertos organismos permiten la degradación, transformación o remoción de los contaminantes a productos metabólicos inocuos compleja para una degradación natural.

- Fisicoquímicos: (electrorremediación, lavado, solidificación/estabilización, etc.), este método utiliza como ventaja las propiedades físicas y químicas de los contaminantes para destruir, separar o contener la contaminación.
- Térmicos: (incineración, vitrificación, desorción térmica, etc.), en los cuales se aplica calor para acelerar la volatilización, quemar, descomponer o inmovilizar los contaminantes en un suelo.

2.9 Biorremediación

La biorremediación ha captado una atención significativa en los últimos años, al consolidarse como un procedimiento que emplea agentes biológicos para eliminar desechos tóxicos presentes en suelos contaminados de acuerdo al estudio de Lin et al. (2022). Esta estrategia, basada en el metabolismo de microorganismos capaces de degradar compuestos peligrosos, se ha convertido en un método eficaz y confiable para la recuperación ambiental de sitios afectados por contaminantes (Sharma et al., 2018).

La biorremediación mediante la aplicación de compost constituye una de las estrategias más utilizadas dentro de esta tecnología, la cual puede implementarse a través de tres enfoques generales: en hileras, en pilas estáticas y en recipientes. Estos métodos han sido ampliamente estudiados debido a su eficacia en la eliminación de contaminantes, aprovechando el potencial biológico del compost para la recuperación de suelos contaminados (Ferreira et al., 2013).

Esto se debe a que factores como la temperatura, el pH, la humedad, el oxígeno, el tamaño de las partículas y la relación C/N, influyen en la tasa de biodegradación del proceso de compostaje. Se ha indicado que una temperatura que oscila entre 45 y 55 °C en fase termófila, un pH de 5,0 a 7,0, una humedad del 50 al 60%, así como una relación C/N que oscila entre el 25 y el 35% son las condiciones óptimas para el compostaje (Ho et al., 2022).

2.9.1 Fundamento bioquímico de la biorremediación

Este fundamento se basa especialmente en las diversas reacciones del óxido-reducción, cuyo objetivo es obtener energía, que se va produciendo a través de lo que se conoce como, cadena respiratoria o transporte efectivo de electrones. Este proceso inicia en las células, donde la cadena empieza a partir de un sustrato orgánico, que es uno de los compuestos de hidrocarburos, los cuales funcionan como un emisor de electrones. La actividad metabólica de dichas células finaliza por degradar y desintegrar esa sustancia (Vizuite-García et al., 2020).

Los microorganismos se emplean comúnmente como aceptores el oxígeno, sulfatos, dióxido de carbono, nitratos y hierro (III). Así, cuando se utilizan sulfatos o dióxido de carbono como aceptores de electrones, la respiración microbiana se da en condiciones anaerobias en función del estudio de Pons-Jiménez et al. (2011). En cambio, cuando el oxígeno actúa como aceptor, la respiración microbiana las condiciones son aerobias (Sharma et al., 2018).

2.9.2 Esquema de las reacciones

Degradación aerobia Sustrato + O₂ biomasa + CO₂ + H₂O

Degradación anaerobia Sustrato + (NO₃-SO₄²⁻ - Fe⁴⁺ Mn⁴⁺ CO₂) biomasa + CO₂ + (N₂, Mn²⁺, S²⁻, Fe²⁺, CH₄).

2.9.3 Ventajas

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Luigui y Paredes (2022), las principales ventajas de la biorremediación son:

- Los tratamientos físicos y, en buena parte de los químicos se basan en transferir la contaminación entre medios gaseoso, líquido y sólido, mientras que en la biorremediación se trata de transferir poca contaminación de un medio a otro.
- Este tipo de tecnología es poco invasiva y generalmente no necesita de componentes estructurales o mecánicos que puede representar una amenaza para el medio.
- Es considerada como una técnica económica y viable, y al tratarse de un proceso natural, suele tener mejor aceptación por parte de la opinión pública.
- No es necesario uso de equipo especializado
- Puede ser aplicada in situ, siendo más económica y eficiente o ex situ.
- Posibilidad de recuperar el suelo contaminado.

2.9.4 Desventajas

La biodegradación incompleta puede accionar intermediarios metabólicos inaceptables, con una capacidad contaminante similar o incluso superior al producto que se inició y algunos compuestos contaminantes son tan resistentes que pueden llegar a causar inhibir la biorremediación conforme al estudio de Kebede et al. (2021). Por lo que, se requiere un extenso monitoreo, para calcular la agilidad de biodegradación. Resulta complicado examinar las mezclas naturales imprevisibles durante la biorremediación ex situ.

Existen riesgos de que las degradaciones de un espacio de los contaminantes generan metabolitos que sean tóxicos, por lo que, su aplicación es sumamente sensible a superficies tóxicas y propiedades medioambientales. Además, se requiere un tiempo, para lograr un nivel de efectividad adecuado, por lo que el proceso se torna difícil y dispendioso.

2.9.5 Proceso de la biorremediación

De acuerdo a Cando Rodríguez (2011), los componentes necesarios para implementar un proceso de biorremediación son:

- Agua: El contenido de agua es uno de los factores más importantes, para la degradación, ya que el agua constituye entre el 80 y el 90% del peso en la composición molecular de las células bacterianas y es el principal nutriente para su desarrollo.

- pH: El valor del pH intracelular se sitúa entre 6,5 y 7,5, por lo tanto 7,5, por lo que este es el intervalo de pH necesario para el crecimiento óptimo de los microorganismos.
- La temperatura: Las reacciones químicas y enzimáticas de la célula aumentan concomitantemente con el aumento de la temperatura.
- Existe una temperatura mínima para cada organismo, cuando se encuentra por debajo de la temperatura requerida no se produce crecimiento, una temperatura óptima a la que el crecimiento es más rápido y una temperatura máxima por encima de la cual ya no se produce crecimiento.
- La temperatura considerada para el óptimo desarrollo de las bacterias aerobias heterótrofas oscila entre los 20°C y 35°C.
- Oxígeno: El oxígeno es el aceptor de electrones más utilizado por los microorganismos para degradar compuestos orgánicos en un medio aeróbico. Si el contenido de oxígeno del suelo es inferior a 2 mg/l, las condiciones son favorables para un medio anaeróbico.
- Nutrientes: La parte sólida de la célula bacteriana está constituida por carbono, nitrógeno, hidrógeno, fósforo y, en menor medida, potasio, calcio, magnesio, cloruros, hierro y otros.
- El componente principal (50%) es el carbono: El contaminante a degradar debe contener este elemento. El oxígeno, con un 20%, es el segundo elemento más abundante en la célula.

2.10 Métodos de recolección de suelos contaminados

De acuerdo a Rozo y Dussán (2010), los diferentes tipos de recolección de suelo son:

- Muestreo aleatorio simple: En este método, se debe seleccionar aleatoriamente varias ubicaciones dentro de un área determinada. Aunque es sencillo, tiene la desventaja de que no siempre garantiza una representación precisa de las áreas más contaminadas. Aplicación: útil cuando se desconoce la distribución de la contaminación.
- Muestreo sistemático: Consiste en tomar muestras distribuidas considerando que se encuentren a intervalos regulares. Este método es más estructurado que el aleatorio es aplicable para evaluar la distribución de contaminantes en áreas más grandes. Aplicación: útil en suelos grandes u homogéneos.
- Muestreo en cuadrícula (método de subcuadrículas): Se establece una cuadrícula sobre el área y se recolectan muestras en puntos donde las líneas de la cuadrícula se cruzan. Este enfoque permite un análisis más detallado de la distribución de los contaminantes en el área. Aplicación: adecuado para áreas donde se espera una distribución heterogénea de contaminantes.
- Muestreo en capas o estratificado: Este método se utiliza cuando se ha esperado que los contaminantes estén distribuidos de manera desigual en diferentes profundidades del suelo. Consiste en tomar muestras a diferentes profundidades en puntos

específicos. Aplicación: común en estudios donde se desea obtener un perfil de contaminación en el suelo (por ejemplo, en sitios contaminados por metales pesados).

- Muestreo de trinchera o excavación: Se excava una trinchera o se toman muestras se obtendrá de diferentes profundidades usando barrenas o cubos. Este método es útil cuando se desea obtener una muestra representativa de capas profundas. Aplicación: necesario en suelos donde se espera que la contaminación se distribuya a distintas profundidades.
- Método de muestreo con barrenas o sondas: Las sondas de muestreo o barrenas se utilizan para recolectar muestras a diferentes profundidades sin la necesidad de excavar grandes áreas. Este método es menos invasivo permite obtener muestras en lugares de difícil acceso. Aplicación: útil para suelos con acceso limitado o cuando se necesita evitar la alteración del área.
- Muestreo por "composite" o compuesto: Consiste en combinar varias muestras tomadas de diferentes puntos del área de estudio para obtener una muestra representativa. Se realiza una mezcla de las muestras y se analiza como una sola unidad. Aplicación: se utiliza cuando se quiere obtener una visión general de la contaminación en un área extensa.

2.11 Método Soxhlet para la determinación de contaminación de suelos

La determinación de contaminantes en el suelo se puede llevar a cabo diversas técnicas, en las cuales se encuentra el método Soxhlet, el cual se realiza en un equipo de vidrio llamado Soxhlet que permite extraer compuestos o contaminantes a través de un solvente de acuerdo al estudio de Martínez-Arévalo et al. (2014). Fue inventado en 1979 por Franz Von Soxhlet y en sus inicios fue desarrollado para extraer un lípido de una muestra de materia sólida. El equipo cuenta con un cilindro de vidrio, vertical y de altura de treinta centímetros próximamente (Halasz et al., 1995).

El equipo Soxhlet es un instrumento de laboratorio diseñado para la extracción de sustancias que poseen baja solubilidad en el solvente de extracción, y en un extractor Soxhlet, la muestra se sumergen en un solvente se calienta por lo cual se extrae periódicamente, se destila y se devuelve a la muestra de acuerdo a Haghollahi et al. (2016). Durante cada ciclo, los compuestos no volátiles se disuelven en el solvente utilizado. Después de varios ciclos, el compuesto deseado se concentra en un matraz de destilación y finalmente se evapora el solvente en un matraz y medir la masa de líquido restante basado en el estudio de Martínez-Arévalo et al. (2014). Ha sido un método utilizado ampliamente dentro de diversas investigaciones, para análisis de la concentración de contaminantes, gracias a su facilidad junto a su eficiencia al momento de obtener resultados con un alto grado de precisión.

2.12 Compostaje

Se define como un proceso de transformación biológica a través de la degradación de la materia orgánica esto provoca la disminución de la materia orgánica para obtener un material más

estable que pueda ser utilizado como fertilizante orgánico. Es generando de manera natural mediante un proceso aeróbico, es decir con la presencia de oxígeno ayuda a la propagación de microorganismos descomponedores de los residuos orgánicos como purines, restos vegetales, excrementos y animales de granja (Cobos Cajamarca, 2023).

Una vez concluida la fase de fermentación dominada por bacterias aerobias, en el proceso de compostaje también pueden encontrarse otras especies microbianas relevantes, como hongos, actinomicetos y diversas bacterias de acuerdo al estudio de Luigui y Paredes (2022). El compostaje se reconoce como un ciclo aeróbico de degradación de biomasa que requiere una alta disponibilidad de oxígeno para facilitar la actividad microbiana y acelerar la descomposición de la materia orgánica.

Para garantizar un compost de calidad, es fundamental que las condiciones del proceso sean óptimas. Factores como la humedad, la temperatura y la aireación deben mantenerse en rangos adecuados, ya que influyen directamente en la eficiencia del proceso y en la estabilidad del producto final tal como indica el estudio de Cobos Cajamarca (2023). La tecnología de compostaje del suelo, o el uso de compost como enmienda, se basa en la capacidad de los microorganismos presentes para degradar contaminantes orgánicos persistentes (OP), aprovechando los nutrientes disponibles en la matriz del compost como fuente de energía (Ren et al., 2018).

Durante este proceso, los residuos orgánicos se transforman en un abono estabilizado que no solo reduce el contenido de humedad, sino que también incrementa las concentraciones de nutrientes esenciales para las plantas, elimina patógenos y semillas de malezas, mejora la capacidad de supresión de enfermedades y contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Bernal et al., 2017).

El compost, además, tiene un alto potencial para mejorar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, al aportar carbono orgánico fácilmente degradable y carbono estable, junto con una variedad de nutrientes esenciales y microorganismos beneficiosos que favorecen la actividad biológica del suelo (Sharma et al., 2018).

Por último, cuando se combina con tecnologías de bioestimulación y bioaumentación, el compostaje se convierte en una herramienta poderosa para la remediación de suelos contaminados. En este contexto, parámetros como la estabilidad del compost adquieren especial relevancia, ya que inciden directamente en la efectividad de la biorremediación (Sayara y Sánchez, 2020).

Desde una perspectiva biológica, el compostaje es una transformación que es realizado por diferentes microbios que a través de metabolitos secundarios y en presencia de oxígeno utilizan compuestos como el carbono y nitrógeno para transformar en biomasa respaldado por la investigación de Ezeah et al. (2023). Es un proceso exotérmico, ya que los microbios producen calor necesario para acelerar la degradación de la materia y un sustrato sólido, con una menor proporción de carbono y nitrógeno (Bernal et al., 2017).

El compostaje acelera la fermentación bioaeróbica de la materia orgánica involucrando que se forme humus, permitiendo un producto estable como lo es el compost tal como lo indica Azim et al. (2018). La sostenibilidad incluye la obtención de nutrientes utilizados para estimular las poblaciones microbianas que degradan los hidrocarburos en función del estudio de Cunningham et al. (2020). Es una tecnología de biorremediación aerobia similar al tratamiento en lechos, el suelo se mezcla con algunos elementos (astillas de madera, paja u otro agente espesante) para proporcionar una porosidad que permita un mejor flujo de aire (Espíritu Canchari y Guerreros Gutierrez, 2022).

2.12.1 Clasificación de sistemas de compostaje

El control en la realización del compostaje implica factores interrelacionados, como la producción de calor, temperatura, ventilación y eliminación de agua que fomenta un desarrollo óptimo. Estas interrelaciones se han tenido en cuenta en diferentes sistemas de compostaje, mediante la utilización de equipos para aportar O₂ a la masa compostable a través de aireación conforme al estudio de Bernal et al. (2017). En Tabla 2 se presentan las técnicas de compostaje y los sistemas abiertos y cerrados de compostaje que funcionan de forma continua o periódica con aireación forzada.

Tabla 2: Técnicas de compostaje.

Técnica de compostaje.	Sistema de compostaje.	Características.
Sistemas abiertos de compostaje (sin reactores).	Pila estática.	Ventilación natural aireación pasiva con efecto chimenea; aireación forzada con succión o soplado en hileras o en silos
	Pila volteada.	Ventilación natural y volteo mecánico, en silos de pasillos, en hileras o en pilas.
Sistema de compostaje cerrados que funcionan de forma continua o periódica con aireación forzada (compostaje en recipientes o reactor).	Reactores de flujo vertical.	Reactores de lecho agitado en movimiento, y sistemas de lecho empacado en movimiento.
	Reactores de flujo horizontal.	Tambores rotativos; contenedores de cama agitados; y lecho de sólidos agitados.

Fuente: (Bernal et al. 2017).

2.12.2 Fases del compostaje

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Azim et al. (2018), se describen las fases del compostaje:

- El proceso de compostaje comienza a temperatura ambiente, avanzando lentamente a medida que se inicia la descomposición de la materia orgánica. Durante las

primeras horas o días, la actividad microbiana se intensifica, lo que provoca un aumento progresivo de la temperatura. Este crecimiento microbiano depende directamente de condiciones óptimas de oxígeno y humedad; en ausencia de estos factores, los microorganismos detienen su actividad, la mezcla se enfría y el proceso de compostaje se interrumpe a base del estudio de Espíritu Canchari y Guerreros Gutierrez (2022). El objetivo en esta fase es alcanzar temperaturas de entre 50 °C y 70 °C, necesarias para avanzar a la siguiente etapa.

- Fase termófila o de higienización: Una vez que la temperatura supera los 45 °C, los microorganismos mesófilos comienzan a desaparecer, dando paso a los microorganismos termófilos, capaces de soportar temperaturas de hasta 100 °C. Esta fase puede prolongarse durante varias semanas o meses, dependiendo del tipo y cantidad de materia orgánica. Las altas temperaturas no solo aceleran la degradación, sino que también cumplen una función clave en la higienización del compost, al eliminar patógenos, semillas de malezas y otros contaminantes biológicos.
- Segunda fase mesófila o fase de enfriamiento: Finalizada la fase termófila, la temperatura comienza a descender progresivamente, acercándose nuevamente a los niveles ambientales. En esta etapa, puede optarse por voltear la mezcla para homogeneizarla y reactivar temporalmente el calentamiento, o dejar que continúe su enfriamiento natural. Durante esta fase, se reactivan los organismos mesófilos, y la descomposición de los compuestos orgánicos más complejos continúa a un ritmo más lento.
- Fase de maduración: En esta fase final, el compost se mantiene en reposo a temperatura ambiente durante un período prolongado, que puede extenderse por varios meses. Este tiempo permite la estabilización y formación de nuevas moléculas orgánicas complejas, lo que mejora la calidad del compost. Asimismo, se integran nuevas poblaciones microbianas y organismos como anélidos, ácaros e insectos, que participan en la finalización del proceso de transformación y enriquecen biológicamente el producto final.

2.12.3 Beneficios del compost en el suelo

Debido al conocimiento junto a un enfoque empírico y a los materiales de compost o biorresiduos no estandarizados, el uso en campo de estos es altamente desafiante, pero también prometedor, tal como lo indica el estudio de Kästner y Miltner (2016). A partir de la enorme diversidad metabólica de microorganismos que se desarrollan durante los procesos de compostaje, se genera una diversidad metabólica altamente compleja como una "memoria metabólica" dentro de los materiales de compost en desarrollo y maduros (Sayara y Sánchez, 2020).

La adición de compost puede considerarse una alternativa confiable al momento de enriquecer un suelo seco, por lo tanto, como una "super bioaumentación" con una mezcla natural

compleja diversidad de microorganismos degradadores, combinada con una "bioestimulación" por sustratos orgánicos que contienen nutrientes de fácil a difícil degradación (Kästner y Miltner, 2016).

Los principales beneficios relacionados al uso de compost en el suelo, incluyen: suministro de nutrientes, secuestro de carbono, supresión de plagas y enfermedades de malezas, aumento en el rendimiento de los cultivos, disminución de la erosión del suelo, retención de la humedad del suelo, mejora de las propiedades biológicas y la biodiversidad del suelo, y ganancia en la calidad nutricional del cultivo (Termorshuizen et al., 2004).

De acuerdo con la investigación de Bernal et al. (2017), la aplicación de compost al suelo genera importantes beneficios al optimizar la calidad de sus propiedades físicas y biológicas. Entre los efectos positivos se destaca la mejora de la estructura del suelo, el aumento en la retención de humedad y la capacidad de intercambio catiónico. Asimismo, el compost ha demostrado ser eficaz para incrementar la porosidad, especialmente en suelos compactados, lo que favorece una mayor aireación y el desarrollo radicular de las plantas. A continuación, la FAO (2019), menciona los siguientes beneficios del compost al suelo:

- Mejora estructura del suelo, lo que agiliza las labores agrícolas.
- Acrecienta la capacidad de retener humedad del suelo.
- Reduce el peligro de erosión y favorece su conservación.
- Mayor regulación de la temperatura del suelo.
- Aumentar la porosidad hídrica y gaseosa
- Mejora de las propiedades químicas:
- Incrementa el contenido de materia orgánica y macronutrientes como el nitrógeno(N), fósforo (P), potasio (k), además, de otros micronutrientes.
- Incrementa la capacidad de intercambio catiónico, facilitando la liberación de los nutrientes de esta manera las plantas pueden asimilar los nutrientes para su desarrollo.
- Proporciona diversos organismos (como bacterias y hongos) que puede degradar sustancias tóxicas y transformar los elementos insolubles del suelo en nutrientes para los microorganismos del suelo y las plantas.
- Minimiza la generación de residuos orgánicos mediante el proceso de compostaje obteniendo un producto estabilizando (compost), beneficiando al ambiente y la economía, como el alargamiento de la vida útil de los sitios de disposición final y ahorro de costos en disposición (Lin et al. 2022).
- Una de sus importantes ventajas del compost es la capacidad de procesar compostaje con los residuos orgánicos domiciliarios, lo que contribuiría significativamente al medio ambiente en la reducción de gases como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄).

2.12.4 Calidad del compost

La calidad del compost final depende de parámetros físicos, químicos y biológicos que, interviene bajo condiciones controladas durante el proceso de descomposición, los cuales generalmente se manejan considerando rangos específicos debidos por la variedad del material de partida (los residuos) y a los posibles cambios en el tiempo de su composición De et al. (2016). Los factores que inciden son la temperatura, humedad, reacción carbono, nitrógeno, oxígeno, pH, entre otros. Por lo habitual la calidad de compost se relaciona con la ausencia de sustancias fitotóxicas como la presencia de metales pesados y patógenos y que mantengan un aspecto y olor aceptable, de cómoda aplicación con un contenido de materia orgánica estabilizada y nutrientes (Cobos Cajamarca, 2023).

2.13 Materia compostable

El material que se usa para realizar el compost es la materia compostable la cual proporciona estructura, una capacidad alta de absorción, minerales que enriquecen el suelo, y la vida microbiana según el estudio de Alanya de la Cruz y Clemente Huamán (2022). Estas características son adquiridas a través de los distintos tipos de materia orgánica disponibles, siendo uno de los ingredientes fundamentales la materia vegetal en descomposición. Esta, combinada con elementos como hojas secas, cartón, madera triturada y residuos orgánicos de cocina, permite iniciar y sostener el proceso de transformación del compost. Este tipo de materia orgánica proporciona la estructura adecuada para el compost, lo que resulta especialmente beneficioso para mejorar suelos que carecen de propiedades físicas adecuadas, como la porosidad, la aireación y la retención de humedad (De et al., 2016).

Para un adecuado proceso de compostaje es importante conocer los diferentes tipos de residuos a compostar, ya que, el material a utilizar es fundamental para iniciar el proceso de descomposición para prevenir efectos negativos durante el proceso (Zamora et al., 2012). En tabla 3 se puede apreciar los parámetros de calidad de compost según la organización mundial de la salud.

Tabla 3: Parámetros de calidad de compost según la organización mundial de la salud.

Propiedades.	Rango ideal.
Contenido de humedad (%)	30 - 50
Material inerte (%)	30 - 70
Contenido orgánico (%)	10 - 30
pH.	6 - 9
Tamaño máximo de las partículas (mm).	2 - 10
Materia orgánica (%)	25 a 50
Carbono (%)	8 a 50
Nitrógeno (%)	0,4 a 3,5
Fósforo (%)	0,3 a 3,5
Potasio (%)	0,5 a 1,8
Plomo (ppm)	200 - 400
Cadmio (ppm)	15 - 40

Fuente: (Lin et al., 2022).

Para un adecuado proceso de compostaje es importante conocer los diferentes tipos de residuos a compostar, ya que, el material a utilizar es fundamental para iniciar el proceso de descomposición para prevenir efectos negativos durante el proceso de acuerdo a Cobos Cajamarca (2023). La tabla 4 muestra la materia orgánica apropiada para iniciar un adecuado proceso de compostaje.

Tabla 4: Materia orgánica apropiada para iniciar un adecuado proceso de compostaje.

Residuo.	Efecto.
Cocina.	
Residuos de fruta y verdura.	Degradación rápida no ocasiona problemas.
Residuos de carne y pescado u otro tipo de marisco	Proclive a causar mal olor y atrae vectores (como roedores).
Huesos	Tardía descomposición. Aporta estructura.
Pasta y arroz cocinado	Compactan el material.
Cascaras de huevo	Tarda en descomponerse. Contribuye con calcio.
Lácteos y derivados	En exceso causa malos olores. No genera problemas en cantidades usuales.
Bolsas de infusión y posos de café	No genera problemas en cantidades usuales
Ceniza de leña sin químicos	Proporciona minerales.
Aserrín	Descomposición de mayor tiempo. Retiene Humedad
Jardín y huerta.	
Césped	En exceso compactan, es necesario equilibrar los materiales.
Residuos de poda, piña, hojas secas.	Degradación lenta. Facilita la aireación
Residuos de cosecha.	Transformación rápida. No genera problemas

Fuente: (Simbaña Cazar, 2016).

2.13.1 Beneficios de la materia compostable y organismos

Los residuos orgánicos después de haber pasado por un proceso de descomposición y transformar sus propiedades ocasionando como resultado un compuesto de minerales necesario para el suelo y las plantas los beneficios obtenidos son variados a continuación conoceremos los más importantes (Ezeah et al., 2023).

- Reducción de residuos: El compostaje de materiales orgánicos es una forma efectiva de reducir los residuos sólidos que terminan en vertederos, ya que estos materiales,

si no se compostan, podrían ocupar grandes cantidades de espacio en los vertederos durante largos períodos de tiempo.

- Mejora la salud del suelo: El compost obtenido de materiales orgánicos se utiliza como un fertilizante natural para mejorar la calidad del suelo. Aporta nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, además de mejorar la estructura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y promoviendo la actividad biológica.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Al descomponer materiales orgánicos en compost, se evita que se genere metano (un gas de efecto invernadero) en los vertederos, el cual se produce cuando los residuos orgánicos se descomponen en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno) en los vertederos, un proceso mucho más perjudicial para el medio ambiente que el compostaje.
- Ciclo cerrado de materiales: Los materiales compostables orgánicos son parte de un ciclo biológico que, al ser compostados, vuelven al suelo como nutrientes, creando un sistema cerrado que promueve la sostenibilidad. Esto reduce la dependencia de recursos externos, como los fertilizantes sintéticos.
- Reducción del uso de plásticos: A medida que los materiales compostables orgánicos reemplazan a los plásticos, se reduce el uso de plásticos de un solo uso, que son uno de los mayores contaminantes del planeta. Esto ayuda a disminuir el consumo de combustibles fósiles y la generación de residuos plásticos.

2.13.2 Principales tipos de microorganismos benéficos presentes en el compostaje

- Bacterias fotosintéticas (*Rhodospseudomonas*): Son microbianos autótrofos que utilizan la radiación solar y el calor del suelo como suministro de energía de esta manera construir aminoácidos, ácidos nucleidos, compuestos bioactivos y azúcares, a partir de segregaciones de las raíces, materia orgánica (carbono) y gases perjudiciales como el amonio y el ácido sulfhídrico. De esta manera fortalecen el desarrollo de la vida vegetal, así el aumento de otros microorganismos benéficos (Das y Adholeya 2012).
- Bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus spp.*): Producen ácido láctico a través de carbohidratos y azúcares, originados principalmente por las bacterias sintéticas y levaduras, además, el ácido láctico actúa como un componente de control de microorganismos indeseables (Zamora et al., 2012). Los estudios realizados establecen que al ácido láctico, es un fuerte esterilizador, suprime microorganismos patógenos e incrementa la rápida descomposición de la materia orgánica, así mismo, los lactobacillus suscitan la fermentación acelerando la descomposición rápida de la celulosa y lignina. Además, poseen la capacidad de inhibir la propagación de microorganismos dañinos promotores de enfermedades como el hongo del género *Fusarium*, que disminuyen el rendimiento de los cultivos y atraen otras plagas (Cano, 2011).

- Bacterias del género *Bacillus spp*: se denominan gran positivas, con apariencia, aerobias estrictos o anaerobias facultativas que en condiciones arduas forman una endospora central, que deforma la estructura de la célula (Viera-Arroyo, 2020).
- Segregan proteínas y metabolitos, eficaz para contrarrestar plagas y enfermedades, favorecen al desarrollo de las plantas a partir de la solubilización de fósforo y la generación de mecanismos de crecimiento como el ácido indol acético; asimismo, participan en la fijación de nitrógeno cuando hacen parte de consorcios microbianos (Ezeah et al., 2023).
- Levaduras (*Saccharomyces spp.*): Son hongos unicelulares de mayor tamaño que las bacterias. Estos microorganismos forman compuestos antimicrobianos, hormonas y encimas a través de aminoácidos y azúcares segregados por las bacterias fotosintéticas, raíces de plantas, raíces de plantas y materia orgánica (Lin et al., 2022). Estas sustancias aumentan la actividad celular y el número de raíces, favoreciendo el crecimiento a las plantas y de los microbianos beneficiosos como las bacterias ácido lácticas y actinomicetos.
- Actinomicetos: Se caracterizan por ser antagonistas de nocivos organismos que, presentarse en los cultivos y en el material orgánico en descomposición, ya que, emiten sustancias antibióticas y biácidas lo que manifiesta Cano (2011). Al mismo tiempo, pueden cohabitar con las bacterias fotosintéticas, para mejorar la biología del suelo, por ende, el desarrollo de las plantas (Acuña et al., 2010).

2.14 Marco legal

Para el proyecto se utilizó la reglamentación por parte del RAHOE (reglamento ambiental de actividades hidrocarburíferas) y el TULAS (texto unificado de legislación ambiental secundaria), libro VI del Anexo 2:

2.14.1 De las actividades que degradan la calidad del suelo

Las organizaciones públicas o privadas dedicadas a la comercialización, almacenamiento y/o producción de químicos, hidroelectricidad, exploración y explotación hidrocarburífera, minera, y agrícola, tomarán todas las medidas pertinentes a fin de que el uso de su materia prima, insumos y/o descargas provenientes de sus sistemas de producción y/o tratamiento, no causen daños físicos, químicos o biológicos a los suelos.

Las sustancias químicas e hidrocarburos deberán almacenarse, manejarse y transportarse de manera técnicamente apropiada, tal como lo establece las regulaciones ambientales del sector hidrocarburífero y la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2266, referente al Transporte, Almacenamiento y Manejo de Productos Químicos Peligrosos, o la que la reemplace. Según el RAHOE (2010):

2.15 Límites permisibles

Parámetros.- Los sujetos de control y sus operadoras y afines en la ejecución de sus operaciones, para descargas líquidas, emisiones a la atmósfera y disposición de los desechos sólidos en el ambiente, cumplirán con los límites permisibles que constan en los Anexos No. 1, 2 y 3 de este Reglamento, los cuales constituyen el programa mínimo para el monitoreo ambiental interno y se reportarán a la Subsecretaría de Protección Ambiental conforme la periodicidad establecida en el artículo 12 de este Reglamento.

Los límites permisibles a aplicarse en un proyecto determinado dependen del uso posterior a darse al suelo remediado, el cual constará en el respectivo Programa o Proyecto de Remediación aprobado por la Subsecretaría de Protección Ambiental. De presentar los suelos naturales (no contaminados) del área concentraciones superiores a los límites establecidos, se pueden incrementar los valores del respectivo parámetro hasta este nivel, siempre que se haya comprobado este fenómeno estadísticamente a través de un monitoreo de suelos no perturbados ni influenciados en la misma área.

Límites permisibles para la identificación de suelos contaminados en todas las fases de la industria hidrocarburífera, incluidas las estaciones de servicio esta información se observa en la tabla 5.

Tabla 5: Límites permisibles de calidad del suelo

Parámetro.	Expresado en	Unidad	Uso agrícola	Uso industrial	Ecosistema sensible
Hidrocarburos totales.	TPH	mg/kg	2000<2500	<4000	<1000
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs).	C	mg/kg	<2	<5	<1

Fuente: (Simbaña Cazar 2016).

Tratamientos Biológicos:

Independiente del tratamiento que el regulado adopte, los suelos contaminados deberán alcanzar los niveles de concentración establecidos en los criterios de remediación de suelos establecidos en la presente Norma.

Los valores serán aplicados de acuerdo al uso de suelo donde se sitúa el área contaminada. Criterios de Remediación o Restauración del Suelo. Los criterios de Remediación o Restauración se establecen de acuerdo al uso que del suelo (agrícola, comercial, residencial e industrial), y son presentados en la Tabla 3. Tienen el propósito de establecer los niveles máximos de concentración de contaminantes de un suelo en proceso de remediación o restauración.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la descripción de los materiales empleados y los métodos utilizados para realizar el estudio sobre la contaminación del suelo por hidrocarburos en la provincia de Orellana en Ecuador. Se especifica la localización geográfica del área bajo investigación y se detallan las coordenadas y límites precisos del lugar afectado. Además, se describe la metodología utilizada para recopilar y analizar muestras de suelo contaminado en aras de proponer una opción viable para su recuperación a través de métodos de biorremediación.

3.1 Ubicación de la zona de estudio

La investigación se realizó en la provincia de Orellana, a una altitud de 500 m s. n. m. Esta es una provincia petrolera donde, en los últimos años, se han registrado numerosas fallas a causa de un mal manejo del petróleo, lo que ha provocado varios derrames. El lugar del estudio está ubicado en una comunidad kichwa llamada Armenia, que pertenece a la parroquia San Luis de Armenia, donde el día 1 de octubre de 2024 ocurrió un derrame debido a la ruptura de un oleoducto.

3.2 Coordenadas y límites

Cuyas coordenadas son X - 0.4650130 / Y - 77.0399010 ubicada en el bloque 7 que se encuentra a cargo por la empresa Petro Ecuador. Los límites son los siguientes:

Norte: Quinta Josaid.

Sur: Rio Napo.

Este: Sra. Melva Ron.

Oeste: Comuna Paco Rumi.

La zona afectada por el derrame está ubicada a las afueras de la ciudad de Orellana, en la parroquia San Luis de Armenia en la estación Payamino 6, donde se produjo el derrame ocasionado por la rotura del oleoducto. En la figura 3 se muestra la ubicación del área afectada dentro de la provincia de Francisco de Orellana.

UBICACIÓN DEL LUGAR AFECTADO POR DERRAME PETROLERO.

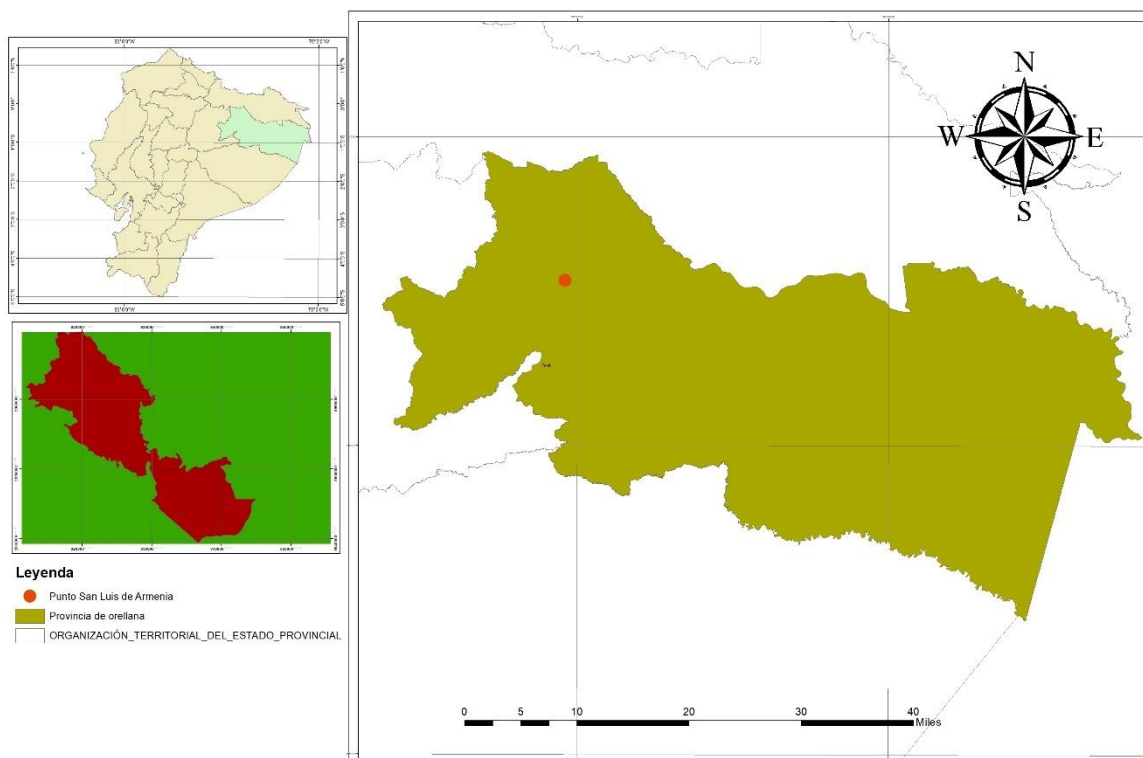


Figura 3: Ubicación de área afectada

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación, se basó de un diseño de tipo experimental para la obtención de muestras. Se programó el viaje con días de anticipación, lo que permitió tener preparadas las herramientas necesarias para la extracción del suelo contaminado por derrames de petróleo, la noche anterior de extraer las muestras, empezaron los días de lluvia.

3.3 Información del lugar de muestreo

La toma de muestras tuvo como finalidad de seleccionar el área de interés, para el estudio de técnicas de remediación de suelos contaminados. Para encontrar el lugar se realizaron investigaciones previas sobre derrames ocurridos en el año 2024, consultando también con los moradores de la ciudad de Orellana.

Gracias a estas investigaciones, se conoció de un derrame ocurrido en San Luis de Armenia el 1 de octubre del 2024, a causa de la ruptura del oleoducto, generándose el derrame de una considerable de petróleo. Debido a las condiciones climáticas por los días de verano, el contaminante no se extendió ampliamente por la zona, lo que permitió recolectar una mayor cantidad en cada una de las muestras. Sin embargo, el suelo, los ríos cercanos y los moradores se vieron afectados por la cantidad de contaminante derramado.

Se llevó a cabo el reconocimiento y análisis del área donde ocurrió el derrame, teniendo en cuenta para la selección de la zona de estudio las afectaciones producidas por los derrames, las

emanaciones naturales, entre otros factores. Una vez identificada la zona de interés, por medio de un muestreo estratificado se obtuvieron las muestras según el anexo 2.

3.4 Diseño Experimental

El diseño experimental se define como aquella metodología en donde el investigador o autor, para los fines de la realización del estudio, manipula una o más variables, de esta manera controlar el resultado obtenido y las conductas desarrolladas a partir de los procedimientos adoptados para realizar el experimento (Vizúete-García et al., 2020).

Para la elaboración y el correcto manejo de las muestras se planteó con las 12 unidades experimentales. Las primeras muestras T0 en una concentración del 0% de compost que se utilizó como testigo, el segundo tratamiento T1 tuvo una concentración del 10% de compost, el tercer tratamiento T2 tuvo una concentración del 20% de compost y el cuarto tratamiento T3 tuvo una concentración del 30% de compost, esto se observa en la figura 4.

Tratamiento de biorremediación aplicando diferentes porcentajes de compost.				
	0%.	10%.	20%	30%
R.1	T 0	T 1	T 2	T 3
R.2	T 0	T 1	T 2	T 3
R.3	T 0	T 1	T 2	T 3

Figura 4: Tratamiento de biorremediación.

En la figura 4 se ilustran las 12 unidades experimentales sometidas a los tratamientos T1, T2 y T3. En 9 de estas unidades, se aplicaron 70 ml de agua libre de cloro utilizando un atomizador, asegurando una distribución uniforme. Este proceso de pulverización se llevó a cabo con una frecuencia de cada 5 días.

3.5 Metodología aplicada

3.5.1 Obtención de muestras

En este proyecto experimental se empleó la biorremediación para tratar suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo HTPs no volátiles, utilizando microorganismos benéficos presentes en una preparación de compost. El proceso experimental tuvo una duración de 50 días. Para la cuantificación de los HTPs se aplicó el método descrito en la normativa APA 3540C, una técnica gravimétrica que consiste en el pesaje de la muestra al inicio y al final del procedimiento. La

extracción de los hidrocarburos se realizó mediante el equipo Soxhlet en el laboratorio CIITT de la Universidad Católica de Cuenca.

Para recolectar las muestras de manera precisa y eficiente se elaboró inicialmente un plan de muestreo que facilitara la identificación de la zona afectada y la delimitación exacta de la región en la que se debía intervenir de acuerdo a Pardo et al. (2020). Se optó por el método más apropiado siguiendo las pautas indicadas en el Anexo 2 del manual de muestreo de suelos. Se llevó a cabo un muestreo aleatorio simple debido a su capacidad para proporcionar muestras representativas que abarcaran toda el área contaminada. Este tipo de muestreo es sencillo y directriz por lo cual se decidió marcar 12 puntos distribuidos equitativamente a lo largo y ancho de la zona afectada. La toma de muestras se llevó a cabo a una profundidad de 30 centímetros y luego se trasladaron al laboratorio para ser tratadas mediante biorremediación (Luigui y Paredes, 2022).

Para la creación de las 12 unidades experimentales, se utilizó la técnica de muestra compuesta, que consistió en mezclar cantidades iguales de muestras individuales en un recipiente compartido Yagual Barzola (2020). Obteniendo 24 kg equivalente a 52 libras de suelo contaminado a una profundidad de 30 cm en base a la metodología de toma de muestra de suelo, y considerando lo entallecido en el Artículo 4.5.1.1 del Anexo 2, Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados (Código Orgánico del Ambiente, 2017).

Todas las muestras se extrajeron a la misma profundidad y se homogeneizaron antes de separar 2 kg (equivalentes a 40,4 libras) de cada muestra combinada para su posterior almacenamiento en recipientes plásticos debidamente etiquetados. El uso de un sistema de cuadrículado fue aplicado en este estudio, para obtener una representación precisa del área que será estudiada, como se observa en la Figura 5, cada cuadrícula se trazó con una medida de 30 x 30 cm.

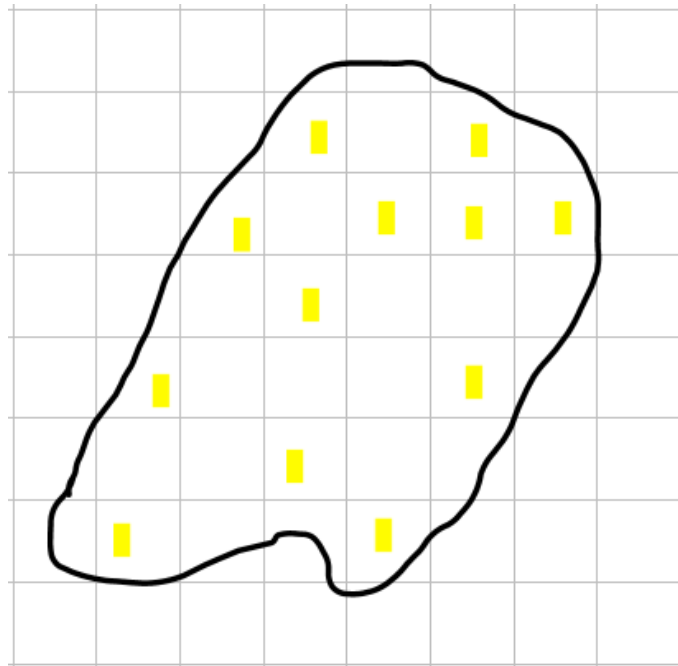


Figura 5: Identificación de puntos para la obtención de muestras.

Este método permite obtener una visión detallada de la variabilidad espacial de los parámetros del suelo, como la textura, pH, el contenido de nutrientes y materia orgánica. A través de la toma de muestras sistemática, se minimiza el riesgo de sesgo en los resultados, lo que asegura que los análisis realizados sean representativos de toda la superficie evaluada como se observa en la figura 6.



Figura 6: Colocación de estacas en los puntos elegidos.

En la figura 6 se muestra el proceso de señalización utilizado, donde se colocaron 12 estacas de carrizo, las cuales registraron toda el área afectada. Este método fue elegido porque el área contaminada no es muy extensa, lo que hace que sea el método más conveniente para este tipo de

casos. Posteriormente, para la recolección del suelo, se utilizó una pala como se presenta en la figura 7.



Figura 7: Recolección de muestras de los diferentes puntos.

Una vez recolectadas las muestras, las mismas fueron tapadas y sellarlas con cinta de embalaje, evitando pérdida de material al transportarlas a la ciudad de Cuenca. En la Figura 8, se observa las muestras obtenidas del lugar afectado.



Figura 8: Muestras recolectadas.

Posteriormente, se retiró de las muestras, cualquier piedra o materia vegetal presente para proceder a homogeneizarlas. Luego, se colocaron todas sobre un plástico y, con una pala, se mezcló todo el suelo. Este proceso se realizó con el objetivo de que los hidrocarburos volátiles se evaporarán y, de esta manera, obtener muestras compuestas (Gabriela Pérez Naranjo et al., 2015). Como se puede apreciar en la figura 9.



Figura 9: Homogeneización de las muestras.

Después de haber realizado la homogeneización, se pesó los 2 kg de suelo, de esta manera se obtuvo muestras similares, para luego colocar en sus respectivos recipientes, para transportarlos a los laboratorios CIITT de la Universidad Católica de Cuenca para realizar los procedimientos requeridos y llevar a cabo la biorremediación en el laboratorio.

3.5.2 Características iniciales del suelo

El estudio del suelo se centró en analizar las propiedades físicas y químicas básicas para comprender mejor su naturaleza y comportamiento durante la biorremediación. Tales características distinguen este suelo de otros tipos y afectan directamente diversos aspectos relacionados a la eficiencia del tratamiento con base el estudio de Escobar-Alvarado et al. (2018). En este contexto, para el presente estudio, se evaluaron el pH real, densidad, humedad, textura, conductividad eléctrica y granulometría. Es fundamental realizar una caracterización detallada del suelo al inicio del proceso ya que brinda datos precisos sobre su condición antes del tratamiento; esto facilitará la evaluación de cualquier cambio que ocurra durante la remediación.

Determinación del pH

La determinación del pH es un análisis que nos permite conocer el porcentaje de ácidos del suelo. Este análisis se realizó en dos muestras de suelo cada una con un peso de 40 g. Una muestra tendrá un alto índice de contaminación mientras que la otra muestra tendrá un índice bajo de contaminación por el hecho que se recolectó a 3m de distancia del lugar afectado.

En este procedimiento se utilizó 40 gramos de suelo para cada muestra, el cual fue colocado en vasos de precipitación con 60 ml de agua destilada, se agitó con una varilla de vidrio se agitó el contenido por unos 3 minutos y se dejó reposar. Se puede apreciar en las siguientes figuras 10 y 11.



Figura 10: Mezcla del agua destilada con el suelo.

Se agregaron 60 ml de agua destilada y se agitaron las muestras por 3 minutos

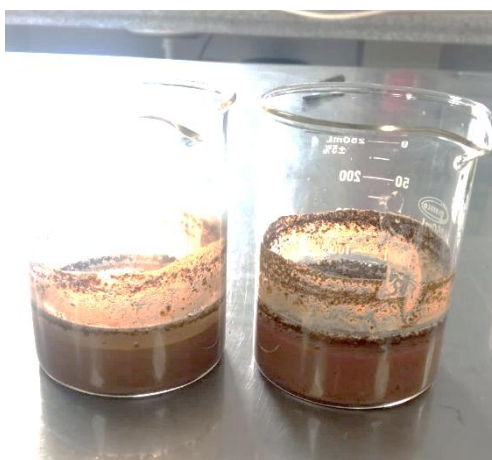


Figura 11: Muestras en reposo.

Las muestras se dejaron en reposo por alrededor de un minuto de esta manera obtener resultados más precisos al momento de medir el pH se observa en la figura 12.

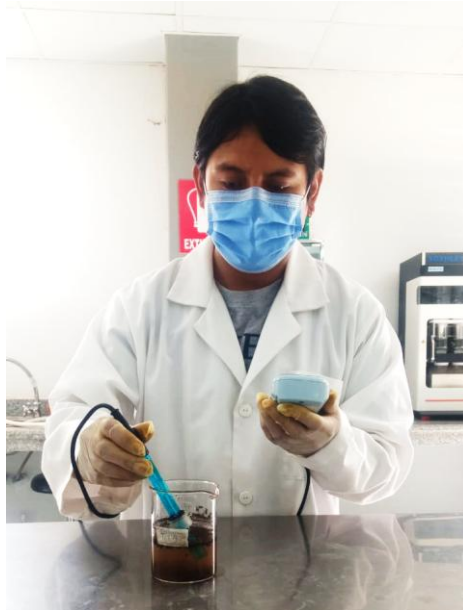


Figura 12: Obtención del pH.

Se observa en la figura 12 que el dispositivo de medición fue introducido dentro de la muestra, se esperó unos segundos para que se estabilice el equipo y registrar su valor. Inicialmente se determinó el pH, lo cual nos indica en que parámetro se encuentra el suelo (ácidos, neutro o alcalino). La muestra de suelo fue analizada por un pHmetro de la marca APERA.

Determinación de la densidad real

Para la obtención de la densidad real, se utilizó un picnómetro, agua destilada y suelo. En primera instancia se pesó el picnómetro se aprecia en la figura 13, para poder llevar a cabo la determinación del parámetro especificado. Posteriormente, se tomó una muestra de 1 gramo de suelo seco y tamizado. La cual fue colocó en el picnómetro, tal y como se muestra en la figura 14.

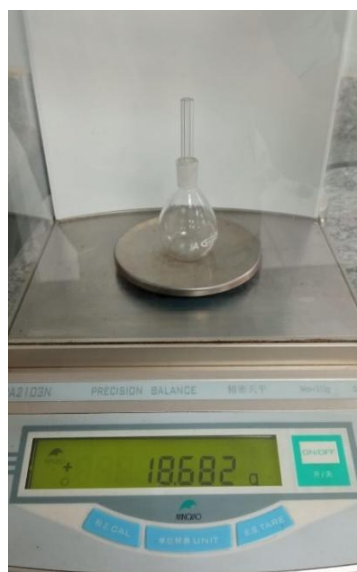


Figura 13: Peso del Picnómetro.



Figura 14: Picnómetro con el suelo y agua destilada.

El picnómetro se llenó hasta el borde, evitando la formación de burbujas de aire. En la figura 14, se observa la mezcla de suelo y agua destilada dentro del dispositivo. Posteriormente, se colocó el tapón cuidadosamente para prevenir la generación de burbujas. Finalmente, se registró nuevamente el peso total y se procedió a realizar el cálculo correspondiente.

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Masa sólida}}{\text{Volumen sólido}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{sólido}} = \text{volumen}_{\text{picnómetro}} - \text{volumen}_{\text{agua}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{agua}} = \frac{\text{Masa agua}}{\text{densidad agua}}$$

$$\text{Masa}_{\text{agua}} = \text{masa}_{\text{picnómetro lleno}} - (\text{masa}_{\text{suelo}} + \text{masa}_{\text{picnómetro vacío}})$$

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó con suelo obtenido a 3 metros de distancia del derrame por hidrocarburos, se tomó aproximadamente 1 kilogramo de suelo, este procedimiento fue realizado en la facultad de ingeniería civil de la Universidad Católica de Cuenca los pasos a seguir para el análisis granulométrico fue el siguiente.

Como paso preliminar se tomaron dos muestras de este suelo aproximadamente entre 40g a 60g también se tomó el peso de los recipientes, tomado estos pesos se dejó en la estufa a 110 C° por 24 horas se observa en la figura 15.



Figura 15: Muestras de suelo para la retención de humedad.

El suelo sobrante se trituró para reducir el tamaño de las formaciones de lodo seco, para luego realizar el lavado para este procedimiento se tomaron 607 g este suelo se colocó en una bandeja luego se sumergió en agua se lo dejó por 20 minutos para facilitar la separación de las partículas que componen este suelo, luego se agitó el agua mientras se hace presión para deshacer las formaciones grandes de suelo y con esta acción provocar que las partículas más pequeñas flotar en agua se observa en la figura 16.



Figura 16: Agregación del agua para su lavado de suelo.

Este procedimiento se repitió varias veces hasta tener el agua completamente transparente. Luego el agua con el suelo se pasó por el tamiz N°200 repitiendo este procedimiento varias veces se observa en la figura 17.



Figura 17: Escurrimiento de la muestra.

Esta agua se vertió sobre un tamiz N°200 las partículas de suelo más pequeñas pasarán por este tamiz quedándose el suelo de mayor volumen este procedimiento se repitió por varias veces hasta llegar a tener el agua completamente clara se puede apreciar el después de ser lavado el suelo en la figura 18.



Figura 18: Suelo lavado.

El suelo lavado se lo coloco en la estufa por 24 horas a 100 C° de esta manera obtener un suelo seco, para poder trabajar de mejor manera el resto del procedimiento, se procedió a tamizar el suelo utilizando tamices N°10, N°40 y N°200 para después colocar en la máquina tamizadora que, con movimientos constantes, la cual separa los diferentes tamaños del suelo, como se observa en la figura 19.



Figura 19: Máquina tamizadora.

Las muestras fueron agitadas por la tamizadora por 2 minutos, la separación de las diferentes texturas de suelo con la tamizadora se pesaron cada porción de suelo para la realización de los cálculos granulométricos. se observa en la figura 20 los diferentes porcentajes de suelo.



Figura 20: Suelo tamizado.

Se puede apreciar los diferentes tamaños que compone el suelo del noroeste de la Amazonia. Se pesaron los suelos retenidos en los tamices para realizar a través de las fórmulas la retención humedad.

Determinación de la retención de humedad

La evaluación de la humedad se llevó a cabo utilizando la siguiente ecuación:

$$\%W = (WH + R (Ws + R)) / (Ws - R) * 10$$

$$\% \text{ retenido } = \text{Ret} / (W \text{ antes de lavado}) * 100.$$

Las dos fórmulas se aplicarán para conocerla estructura según los pesos obtenidos en los diferentes tamices.

3.5.3 Preparación de los tratamientos

Para este procedimiento se obtuvo el compost realizado por la Universidad Católica de Cuenca en la facultad de posgrados, se obtuvo un total de 10 libras de compost y su análisis físico químico por el laboratorio Bionika.

El análisis físico-químico de los abonos orgánicos permite conocer su composición, la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, su pH, su capacidad de retención de agua, la presencia de contaminantes. Esto permite identificar los elementos que predominan en el abono y otros factores que determinan su calidad y efectividad está relacionada con la vida microbiana presente en el compost. Este tipo de análisis proporciona información clave para su adecuado uso en diferentes tipos de suelos y cultivos, asegurando que se aprovechen de manera eficiente sus propiedades fertilizantes según el estudio de Möller y Schultheiß (2015). Los materiales utilizados para este procedimiento fueron una balanza gramera digital y un recipiente para pesar el compost, como se observa en la figura 21.



Figura 21: Pesaje de compost para las muestras.

Luego se pesaron 400g equivalente al 20% de esta manera se fueron pesando según el porcentaje de compost necesario para el tratamiento del 10%, 20% y 30% para las 9 unidades de estudio de suelo como se observa en la figura 22.



Figura 22: Aplicación de compost en la muestra.

En figura 22 se agregaron un total de 200 g de compost, equivalente al 10% de la muestra total de suelo contaminado, de igual manera se aplicó el compost en las diferentes muestras, para luego mezclar con el suelo contaminado se observa en la figura 23.



Figura 23: Mezcla del compost con el suelo.

En este procedimiento se aseguró que el suelo quedara bien integrado con el compost, garantizando una reacción uniforme en todo el sustrato. De este modo los microorganismos podrían actuar de una manera más eficiente. Posteriormente se agregaron 60 ml de agua sin cloro con un atomizador, como se observa en la figura 24.



Figura 24: Humectación de las muestras.

Se agregó el agua natural en las muestras que contienen compost de esta manera fomentar su desarrollo.

3.5.4 Cuantificación de HTPs

Para este procedimiento, se realizó el secado y aireación a temperatura ambiente. Luego, se tomó una cantidad de 200 g de suelo de cada muestra, la cual fue triturada para obtener partículas más pequeñas en las cuales el tratamiento tendrá mejor efectividad y los resultados serán más precisos, garantizando que cada una de las muestras sea tratada de manera adecuada.

Para iniciar este procedimiento y obtener las concentraciones iniciales de hidrocarburos en el suelo, se fabricaron conos con el papel filtro, doblando la punta del cono para evitar que el suelo se escapara. Primero se pesó el cono vacío registrando su peso, luego se añadieron 5g de suelo contaminado con ayuda de la espátula se introdujo el suelo como se ve en la figura 25.



Figura 25: Pesado de la muestra de suelo.

Se agrega el suelo contaminado utilizando una espátula de las partículas más pequeñas de suelo hasta llegar a los 5g se registra los pesos con los decimales correspondientes. Después de haber registrado el peso de los 5 g de cada muestra, se colocaron en la estufa por 24 horas a 110 C°, según lo ilustrado en la figura 25.



Figura 26: Procesos de desecado de las muestras en la estufa por 24h a 110 C°.

Los tratamientos de suelo permanecieron dentro de la estufa por 24 horas a 110 C, con sus respectivas identificaciones. Después de que el tiempo de exposición en la estufa había pasado, se retiraron, cuidadosamente utilizando guantes de cuero. Las muestras fueron colocadas uno por uno en el desecador en donde se dejaron reposar por 10 minutos, como se aprecia en la figura 27:



Figura 27: Proceso de desecado de las muestras antes de la extracción por Soxhlet.

Después de los 10 minutos en el desecador con la válvula cerrada, para evitar que el ambiente externo alterara las muestras por el ambiente externo. Posteriormente, se procedió a pesar nuevamente todos los tratamientos. Una vez obtenidos los pesos de cada muestra, se preparó el equipo Soxhlet para llevar a cabo el lavado del contaminante, utilizando alcohol metílico como disolvente de extracción.

Para luego utilizar los 100 ml de alcohol metílico como disolvente por cada muestra se aprecia en la Figura 28, así mismo, se midió los 100 ml en la probeta para luego vaciarlo en los matraces de vidrio de la máquina Soxhlet, se realizaron 2 repeticiones de 6 unidades, con un tiempo de 5 horas cada repetición.



Figura 28: Preparación de los matraces con adición de alcohol metílico para la extracción por Soxhlet.

En la figura 28 se muestra cómo se agregó el alcohol dentro de la probeta hasta alcanzar la medida de los 100 ml. Posteriormente, el disolvente fue agregado en los matraces de ebullición para ser colocadas en la plancha calefactora del equipo Soxhlet se observa en la figura 29.



Figura 29: Preparación del matraz de ebullición en el equipo Soxhlet.

En la figura 29 se aprecia cómo se colocó correctamente el matraz de ebullición sobre la plancha calefactora en la parte inferior del sistema Soxhlet. La plancha se encendió 10 minutos antes para alcanzar la temperatura adecuada antes de comenzar el proceso. Luego de eso y tal como se ilustra en la Figura 30, las muestras de suelo contaminada se introdujeron en el cartucho de extracción para proceder al lavado del suelo utilizando un solvente de manera que se lograra separar y extraer los hidrocarburos presentes.



Figura 30: Colocación de las muestras dentro del cartucho de extracción.

Las muestras fueron colocadas una a una, dentro del cartucho de extracción asegurándose en momento de regresar el extractor a su lugar original quede bien sellado.

Método de extracción.

El disolvente se calienta en la plancha calefactora y comienza a evaporarse, pasa al condensador y se convierte nuevamente en líquido. El disolvente fluye a través del thimble (cartucho) que tiene la muestra de suelo, disolviendo los contaminantes orgánicos presentes en ella. Después de un ciclo de evaporación y condensación, el disolvente cargado con los contaminantes regresa al vaso de destilación. Este proceso se repite varias veces (generalmente de 15 a 20 ciclos) en el tiempo de las 5 horas, permitiendo una extracción eficiente de los compuestos solubles se observa en la figura 31.



Figura 31: Proceso de extracción de HTPs en el solvente alcohol metílico, de las muestras contaminadas, por medio del Soxhlet.

Al terminar estos ciclos y finalizar el proceso Soxhlet se procede a colocar nuevamente las muestras en la estufa por 24 horas a 120 °C, para realizar el desecado de las muestras y volver a pesar el cono de papel filtro con el suelo lo cual se espera un porcentaje menor de lo que se inició el tratamiento. Se volvió a realizar el mismo procedimiento Soxhlet 4 veces más.

El alcohol metílico paso por diferentes cambios de color al transcurso de los 50 días de tratamiento notándose un cambio de color de las dos muestras presentadas en la figura 32 y 33 dos cambios de color completamente diferentes.

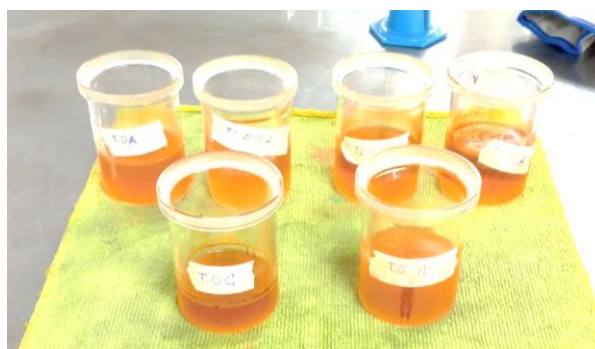


Figura 32: Alcohol metílico en el primer día de extracción.

Se observa en la figura 32 un color tomate oscuro y una mayor evaporación del alcohol.



Figura 33: Extracto de HTPs en alcohol metílico en el último día de extracción.

En la figura 33 se observa un color amarillo claro excepto por una muestra que pertenece a la muestra testigo, confirmando que existe cambios en el suelo contaminado. La biorremediación aplicando compost como un aditivo para acelerar el proceso de degradación del hidrocarburo fue exitosa porque no se necesitó un tiempo más prolongado para ver alteraciones causadas por los microorganismos que habitan en el compost.

La causa del color claro del alcohol en los matraces de ebullición se debe a los porcentajes de compost, los matraces del centro pertenecen a las muestras del 30% de compost demostrando que ayuda a disipar el contaminante.

3.6 Metodología para el análisis de resultados

Para analizar los datos recolectados en este estudio, se emplearon herramientas estadísticas para evaluar la efectividad del compost en distintas concentraciones (0 %, 10 %, 20 % y 30 %) como agente de biorremediación en suelos contaminados por HTPs. La información fue procesada utilizando el software Rstudio el cual facilitó la organización, procesamiento y visualización precisa de los resultados en cada fase del experimento.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía, para determinar si existían diferencias significativas, entre los niveles de concentración de HTPs (expresados en mg/kg) de los tratamientos aplicados, bajo un nivel de significancia del 5 % ($p < 0.05$). Además, se llevó a cabo el análisis de Tukey para comparar distintos tratamientos y determinar cuáles mostraban diferencias significativas en la eliminación del contaminante. Este análisis permitió comprobar si existían diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento de control y los tratamientos que incorporaban compostaje, y entre estos últimos entre sí.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el tiempo de los 50 días que duró la biorremediación, en la cual el primer análisis, son importantes para saber la concentración de HTPs en el suelo que ha provocado el derrame. Esta información inicial servirá para comparar con los datos finales y verificar los cambios que produce el compost en un suelo contaminado por hidrocarburos.

Este estudio se enfocó en analizar la efectividad del compost como agente de biorremediación para suelos contaminados por petróleo, evaluando los resultados obtenidos en diversas condiciones experimentales. Los datos presentados a continuación proporcionan una comprensión más profunda de los procesos involucrados en la biorremediación de suelos, destacando el papel del compost en los tratamientos aplicados a la contaminación petrolera.

4.1 Resultado del pH

El resultado del pH del suelo contaminado por el derrame de petróleo fue de 5,82. Los valores registrados por el pHmetro indican que el suelo tiene una concentración ligeramente ácida.

4.2 Monitoreo de temperatura

Se registró la temperatura de los días en los que se llevó a cabo el método Soxhlet, con el propósito de calcular una temperatura promedio mantenida durante ese periodo. Los datos correspondientes se presentan en la tabla 6.

Tabla 6: Temperatura registrada en °C.

Fechas.	Temperatura.
26/11/24	20°C
30/11/24	21°C
4/12/24	19°C
8/12/24	18°C
11/12/24	19°C
15/12/24	20°C
18/12/24	17°C
22/12/24	19°C
25/12/24	20°C
30/12/24	18°C
5/1/25	21°C
10/1/25	19°C
15/1/25	18°C

La temperatura fue tomada los días que se realizó la extracción de contaminante con el equipo Soxhlet. En rangos moderados de temperatura (generalmente entre 18°C y 21°C), ayudando a que realicen los microorganismos la biorremediación tienen una actividad metabólica óptima a estas temperaturas como señala el estudio de Hernández Valencia et al. (2017). Lo que favorece la degradación de contaminantes como hidrocarburos, metales pesados, las condiciones micro climáticas promedio del laboratorio durante el ensayo fueron 19,15 °C.

4.3 Resultados granulométricos

El porcentaje de agua contenida en una muestra de material (como suelo, arena, arcilla etc.), comparado con su peso seco. La humedad puede influir significativamente en las propiedades físicas del material. En la tabla 7 se expresa los pesos obtenidos en las 2 muestras para obtener el porcentaje utilizando el cálculo de humedad.

Tabla 7: Promedio de humedad en porcentaje.

Muestra de suelo.	Masa de recipiente vacío. R(g)	Masa de capsula más suelo. m2 WH+R(g)	Masa de muestra después de la estufa M WS+R(g).	$\%W = \frac{WH+R(WS+R)}{WS-R} * 100$	Promedio.
Muestra 1	32,6	86,2	83,0	6,35%	5,64
Muestra2.	52,8	108,1	105,5	4,83%	

Se aprecia en la tabla 7, que la muestra 1 poseía un mayor porcentaje de humedad obteniendo un 6,35% que la muestra 2 que obtuvo un porcentaje de 4,83% obteniendo un promedio del 5,64.

En la tabla 8 se observa los pesos obtenidos por los diferentes tamices que tienen aberturas de malla de diferentes tamaños (normalmente con medidas estandarizadas), y a medida que los suelos se tamizan, las partículas más grandes quedan retenidas en los tamices superiores, mientras que las partículas más pequeñas pasan a través de los tamices inferiores.

Tabla 8: Pesos en gramos y porcentaje de suelo retenidos por los 3 diferentes tamices.

Tamiz N°	Abertura (mm)	Peso retenido (gramos)	Peso retenido acumulado (gramos)	% Retenido. $\% \frac{\text{retenido}}{\text{antes del lavado}} * 100$	% Pasa. 100 - %retenido.
10	2	13	13	2,14	97,86
40	0,42	46,2	59,2	7,61	92,39
200	0,074	72,8	132	11,99	88,01
Fondo.		3,9			
Total		135,9			

En la tabla 8 se pueden observar los diferentes tamices utilizados, junto con sus respectivas aberturas en milímetros (mm). De esta manera, se obtienen distintas texturas, lo cual permite utilizar el peso del suelo en el cálculo del porcentaje retenido. Los resultados se presentan en dicha tabla.

La curva granulométrica representa la distribución de los tamaños de partículas en una muestra de suelo o material granular. Los suelos están constituidos por partículas de diferentes dimensiones, y esta gráfica permite identificar la proporción de partículas que se encuentran dentro de rangos específicos. Entre estos tamaños se incluyen arena, limo, arcilla y grava, que se distinguen principalmente por su diámetro. En la figura 34 se aprecia la tendencia de esta curva.

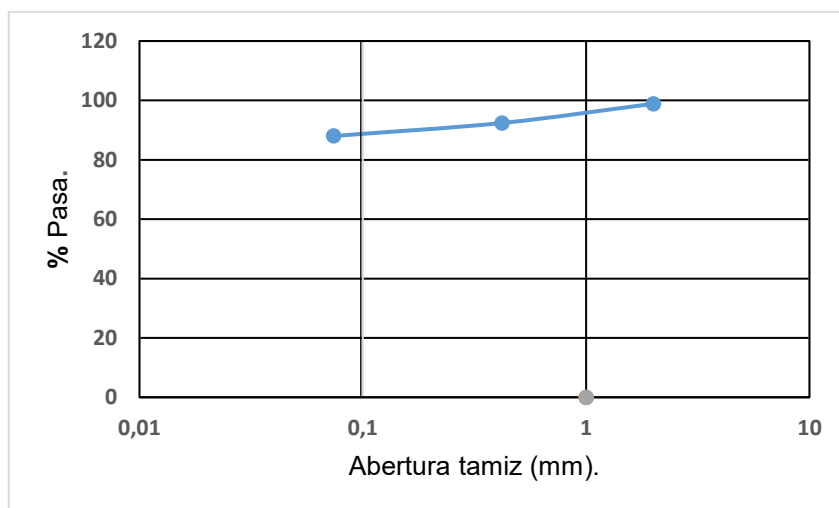


Figura 34: Curva Granulométrica.

La tendencia de la curva está entre el 80% y 100% que pasa, esto quiere decir que en este caso el suelo tiene una alta proporción de partículas pequeñas, lo que indica que es más fino, como un suelo limoso o arcilloso (Gabriels y L, 2006).

4.4 Concentración de HTPs

4.4.1 Concentración de HTPs inicial de la experimentación

Para determinar la concentración inicial de HTPs en las 12 muestras analizadas, se procedió a registrar el peso del suelo en tres etapas clave: antes del proceso de desecado, después del proceso de desecado, y posteriormente el peso del suelo seco tras la aplicación del método Soxhlet. Estos datos fueron esenciales para la elaboración de una tabla que detalla la concentración del contaminante, así como para calcular su promedio.

En la tabla 9 se registran las concentraciones iniciales de hidrocarburos correspondientes a los diferentes tratamientos, tras haber aplicado el método Soxhlet.

Tabla 9: Concentración de HTPs en el primer análisis.

Muestra de suelo.	Peso del suelo desecado antes del Soxhlet.	Peso del suelo desecado después del Soxhlet.	Diferencia de peso cont.	%	Concentración (mg/kg).	Promedio (mg/kg).
T0	4746	4489	257	5,415	54150,864	51637,022
T0	4642	4426	216	4,653	46531,667	
T0	4647	4395	252	5,423	54228,535	
T1	4623	4356	267	5,775	57754,705	57895,336
T1	4549	4296	253	5,562	55616,619	
T1	4576	4300	276	6,031	60314,685	
T2	4465	4278	187	4,188	41881,299	50993,125
T2	4536	4270	266	5,864	58641,975	
T2	4499	4263	236	5,246	52456,101	
T3	4449	4206	243	5,462	54619,016	54802,100
T3	4448	4224	224	5,036	50359,712	
T3	4577	4305	272	5,943	59427,573	

Los porcentajes de concentración del contaminante obtenidos en el primer análisis, mediante el método Soxhlet, fueron medidos en mg/kg de suelo. Se observó que la concentración más alta de hidrocarburos corresponde a la muestra T1 con un valor de 60314,685 mg/kg, mientras que la concentración más baja se registró en el tratamiento T2, con un valor de 41881,299 mg/kg. En promedio, las muestras testigo T1, presentan la concentración más alta, con un valor de 57895,336 mg/kg de suelo contaminado, mientras que el tratamiento T2 tiene el promedio más bajo, con un valor de 50993,125 mg/kg de suelo contaminado.

4.4.2 Concentración de HTPs en los 8 días de experimentación

Para determinar la concentración de HTPs en las 12 muestras analizadas, se procedió a registrar el peso del suelo en tres etapas clave: antes del proceso de desecado, después del proceso de desecado, y posteriormente el peso del suelo seco tras la aplicación del método Soxhlet. Estos

datos fueron esenciales para la elaboración de una tabla que detalla la concentración del contaminante, así como para calcular su promedio.

En la tabla 10 se registran las concentraciones de hidrocarburos correspondientes a los diferentes tratamientos, tras haber aplicado el método Soxhlet.

Tabla 10: Concentración de HTPs en el segundo análisis.

Muestra de suelo.	Peso del suelo desecado antes del Soxhlet.	Peso del suelo desecado después del Soxhlet.	Diferencia de peso cont.	%	Concentración (mg/kg).	Promedio (mg/kg).
T0	4708	4463	245	5,204	52039,082	50390,067
T0	4624	4394	230	4,974	49740,484	
T0	4677	4446	231	4,939	49390,635	
T1	4319	4116	203	4,700	47001,621	41627,748
T1	4348	4180	168	3,864	38638,454	
T1	4281	4113	168	3,924	39243,167	
T2	4305	4107	198	4,599	45993,031	43601,310
T2	4338	4166	172	3,965	39649,608	
T2	4340	4144	196	4,516	45161,290	
T3	4337	4128	209	4,819	48189,993	45929,819
T3	4365	4152	213	4,880	48797,251	
T3	4338	4161	177	4,080	40802,213	

Los porcentajes de concentración del contaminante en el segundo análisis, obtenidos mediante el método Soxhlet y medidos en mg/kg de suelo, muestran que la concentración más alta de hidrocarburos corresponde a la muestra testigo T0, con un valor de 52039,082 mg/kg, mientras que la concentración más baja se registró en el tratamiento T1, con 38638,45 mg/kg. En promedio, las muestras testigo T0, presentan la concentración más alta, con un valor de 50390,067 mg/kg, mientras que el tratamiento T1 tiene el promedio más bajo, con un valor de 41627,748 mg/kg de suelo contaminado.

4.4.3 Concentración de HTPs a los 16 días de experimentación

Para determinar la concentración de HTPs en las 12 muestras analizadas, se procedió a registrar el peso del suelo en tres etapas clave: antes del proceso de desecado, después del proceso de desecado, y posteriormente el peso del suelo seco tras la aplicación del método Soxhlet. Estos datos fueron esenciales para la elaboración de una tabla que detalla la concentración del contaminante, así como para calcular su promedio.

En la tabla 11 se registran las concentraciones de hidrocarburos correspondientes a los diferentes tratamientos, tras haber aplicado el método Soxhlet.

Tabla 11: Concentración de HTPs en el tercer análisis.

Muestra de suelo.	Peso del suelo desecado antes del Soxhlet.	Peso del suelo desecado después del Soxhlet.	Diferencia de peso cont.	%	Concentración (mg/kg).	Promedio (mg/kg).
T0	4646	4409	237	5,101	51011,623	49674,332
T0	4640	4413	227	4,892	48922,414	
T0	4665	4436	229	4,909	49088,960	
T1	4251	4084	167	3,928	39284,874	38937,538
T1	4237	4084	153	3,611	36110,456	
T1	4177	4004	173	4,142	41417,285	
T2	4102	3939	163	3,974	39736,714	40395,602
T2	4028	3863	165	4,096	40963,257	
T2	4026	3863	163	4,049	40486,836	
T3	4013	3847	166	4,137	41365,562	40728,744
T3	4057	3893	164	4,042	40423,959	
T3	4134	3967	167	4,040	40396,710	

En el tercer análisis, los porcentajes de concentración del contaminante, obtenidos mediante el método Soxhlet y medidos en mg/kg de suelo, muestran que la concentración más alta de hidrocarburos se encuentra en la muestra testigo T0, con un valor de 51011,623 mg/kg, mientras que la más baja corresponde al tratamiento T1, con 36110,456 mg/kg. Las muestras testigo T0 presentan un promedio más alto, con un valor de 49674,332 mg/kg, mientras que el tratamiento T1 tiene el promedio más bajo, con un valor de 38937,538 mg/kg de suelo contaminado.

4.4.4 Concentración de HTPs a los 26 días de experimentación

Para determinar la concentración de HTPs en las 12 muestras analizadas, se procedió a registrar el peso del suelo en tres etapas clave: antes del proceso de desecado, después del proceso de desecado, y posteriormente el peso del suelo seco tras la aplicación del método Soxhlet. Estos datos fueron esenciales para la elaboración de una tabla que detalla la concentración del contaminante, así como para calcular su promedio.

En la tabla 12 se registran las concentraciones de hidrocarburos correspondientes a los diferentes tratamientos, tras haber aplicado el método Soxhlet.

Tabla 12: Concentración de HTPs del cuarto análisis.

Muestra de suelo.	Peso del suelo desecado antes del Soxhlet.	Peso del suelo desecado después del Soxhlet.	Diferencia de peso cont.	%	Concentración (mg/kg).	Promedio (mg/kg).
T0	4597	4371	226	4,916	49162,497	49403,212
T0	4584	4353	231	5,039	50392,670	
T0	4645	4419	226	4,865	48654,467	
T1	4226	4062	164	3,881	38807,383	38408,109
T1	4222	4046	176	4,169	41686,405	
T1	4175	4030	145	3,473	34730,539	
T2	3997	3835	162	4,053	40530,398	37672,919
T2	4178	4019	159	3,806	38056,486	
T2	4066	3926	140	3,443	34431,874	
T3	4014	3866	148	3,687	36870,952	37430,970
T3	4039	3884	155	3,838	38375,836	
T3	4076	3925	151	3,705	37046,124	

En el cuarto análisis, los porcentajes de concentración del contaminante, obtenidos mediante el método Soxhlet y medidos en mg/kg de suelo, muestran que la concentración más alta de hidrocarburos se encuentra en la muestra testigo T0, con un valor de 50392,670 mg/kg, mientras que la concentración más baja corresponde al tratamiento T2, con un valor de 34431,874 mg/kg. Las muestras testigo T0 presentan un promedio más alto, con un valor de 49403,212 mg/kg, mientras que el tratamiento T3 tiene el promedio más bajo, con un valor de 37430,970 mg/kg de suelo contaminado.

4.4.5 Concentración de HTPs en los 50 días de experimentación

Para determinar la concentración de HTPs en las 12 muestras analizadas, se procedió a registrar el peso del suelo en tres etapas clave: antes del proceso de desecado, después del proceso de desecado, y posteriormente el peso del suelo seco tras la aplicación del método Soxhlet. Estos datos fueron esenciales para la elaboración de una tabla que detalla la concentración del contaminante, así como para calcular su promedio.

En la tabla 13 se registra las concentraciones de hidrocarburos de los diferentes tratamientos después a ver aplicado el método Soxhlet.

Tabla 13: Concentración de HTPs en el quinto análisis.

Muestra de suelo.	Peso del suelo desecado antes del Soxhlet.	Peso del suelo desecado después del Soxhlet	Diferencia de peso cont.	%	Concentración (mg/kg).	Promedio (mg/kg).
T0	4631	4406	225	4,859	48585,619	49509,434
T0	4620	4392	228	4,935	49350,649	
T0	4645	4410	235	5,059	50592,034	
T1	4279	4128	151	3,529	35288,619	34010,911
T1	4212	4074	138	3,276	32763,533	
T1	4120	3980	140	3,398	33980,583	
T2	4132	3987	145	3,509	35091,965	36357,451
T2	4071	3916	155	3,807	38074,183	
T2	4094	3947	147	3,591	35906,204	
T3	3943	3793	150	3,804	38042,100	35976,260
T3	4042	3894	148	3,662	36615,537	
T3	3216	3109	107	3,327	33271,144	

En el quinto y último análisis, los porcentajes de concentración del contaminante, obtenidos mediante el método Soxhlet y medidos en mg/kg de suelo, muestran que la concentración más alta de hidrocarburos corresponde a la muestra testigo T0, con un valor de 50592,034 mg/kg, mientras que la más baja se encuentra en el tratamiento T1, con 32763,533 mg/kg. Las muestras testigo T0 presentan un promedio más alto, con un valor de 49509,434 mg/kg, mientras que el tratamiento T1 tiene el promedio más bajo, con un valor de 34010,911 mg/kg de suelo contaminado.

4.5 Proyección de la degradación de hidrocarburos en los 50 días de estudio

El método de extracción Soxhlet se repitió 5 veces durante un período de 50 días, obteniendo diferentes concentraciones en sus promedios cada vez que se utilizó este método. En la tabla 14 se muestran las concentraciones promedio de HTPs obtenidas en los distintos tratamientos al transcurso del tiempo.

Tabla 14: Promedios de la concentración HTPs en el transcurso del tiempo, en mg/kg.

	T0	T1.	T2.	T3.
Extracción contaminante por Soxhlet.	Concentración promedio.	Concentración promedio.	Concentración promedio.	Concentración promedio.
1	51637,022	57895,336	50993,125	54802,100
2	50390,067	41627,748	43601,310	45929,819
3	49674,332	38937,538	40395,602	40728,744
4	49403,212	38408,109	37672,919	37430,970
5	49509,434	34010,911	36357,451	35976,260

En la tabla 14 se muestran los diferentes cambios que experimentaron los tratamientos durante los días en que duró la biorremediación, observándose una mayor degradación en los tratamientos T1, T2 y T3 en comparación con el tratamiento T0 (testigo). En la tabla 15 se presenta el porcentaje de efectividad de degradación de HTPs en los distintos tratamientos.

Tabla 15: Porcentaje de degradación de HTPs de los diferentes tratamientos.

Tratamiento	T0	T1	T2	T3
Porcentaje	4,120	41,252	28,701	34,352

En la tabla 15 se muestra el porcentaje de reducción, donde el valor inicial de hidrocarburos en el suelo fue del 100%. Se observa que el tratamiento T1 logró disminuir una mayor cantidad de contaminante, obteniendo una reducción del 41,252%.

Las figuras 35, 36, 37 y 38 muestran la evolución de los cambios ocurridos en los diferentes tratamientos mediante la extracción del contaminante por el método Soxhlet, que se realizó 5 veces durante el siguiente período de tiempo: del día 1 al día 8, al día 16, al día 23 y al día 50.

En la figura 35 se evidencian los cambios de concentraciones que tuvieron lugar en el testigo.

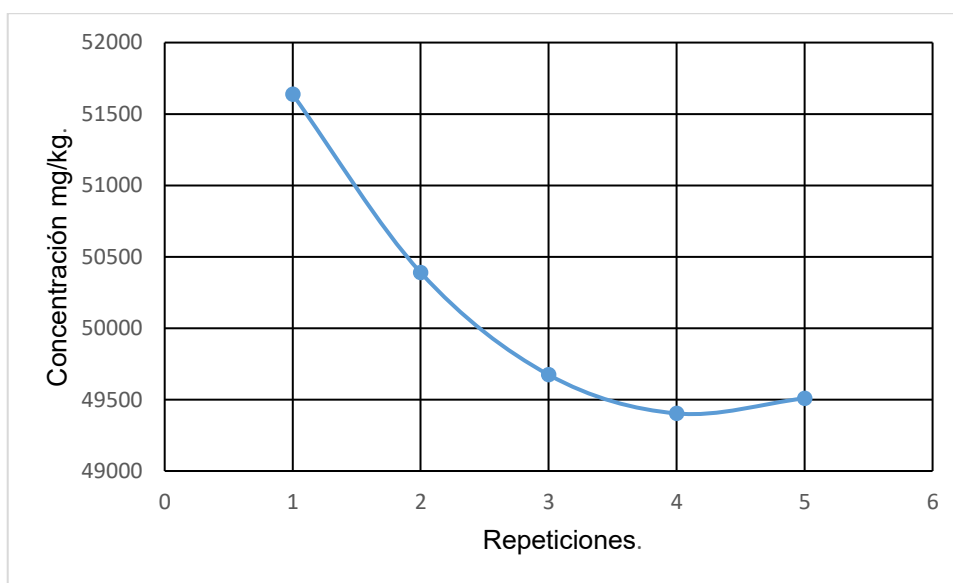


Figura 35: Testigo al 0% de compost.

En la figura 35 se observa que sirvió como muestra testigo con un 0% de compost, comenzó con un promedio de 51637,022 mg/kg. Durante los 50 días que duró el tratamiento, su concentración final fue de 49509,434 mg/kg, lo que indica que la degradación de HTPs fue mínima.

En la figura 36 se evidencian los cambios de concentraciones que tuvieron lugar en el tratamiento T1.

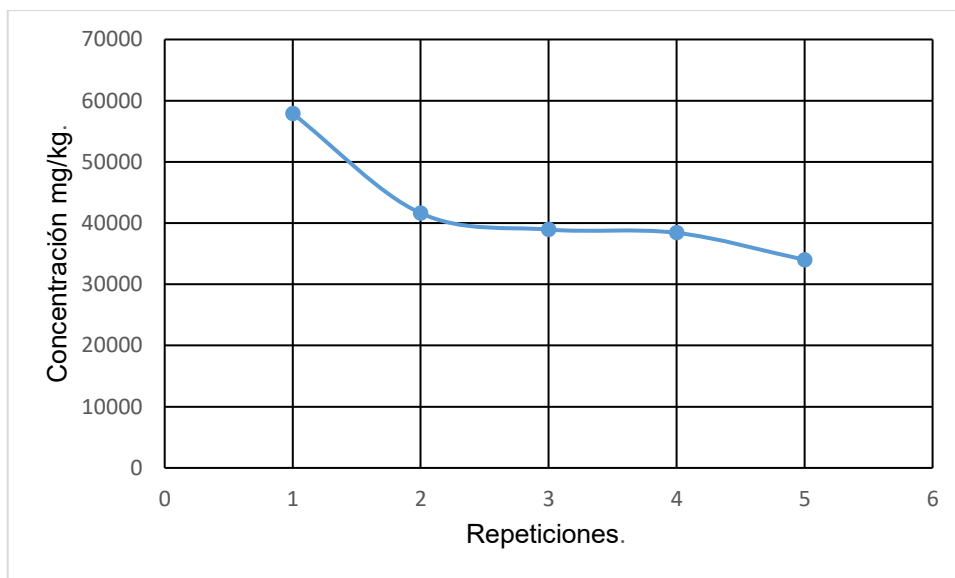


Figura 36: Tratamiento al 10% de compost.

El tratamiento T1, con un 10% equivalente a 200 g de compost, comenzó con una concentración promedio de 57895,336 mg/kg. Durante los 50 días que duró el tratamiento, su concentración final fue de 34010,911 mg/kg, lo que indica una tendencia de degradación según la gráfica.

En la figura 37 se evidencian los cambios de concentraciones que tuvieron lugar en el tratamiento T2.

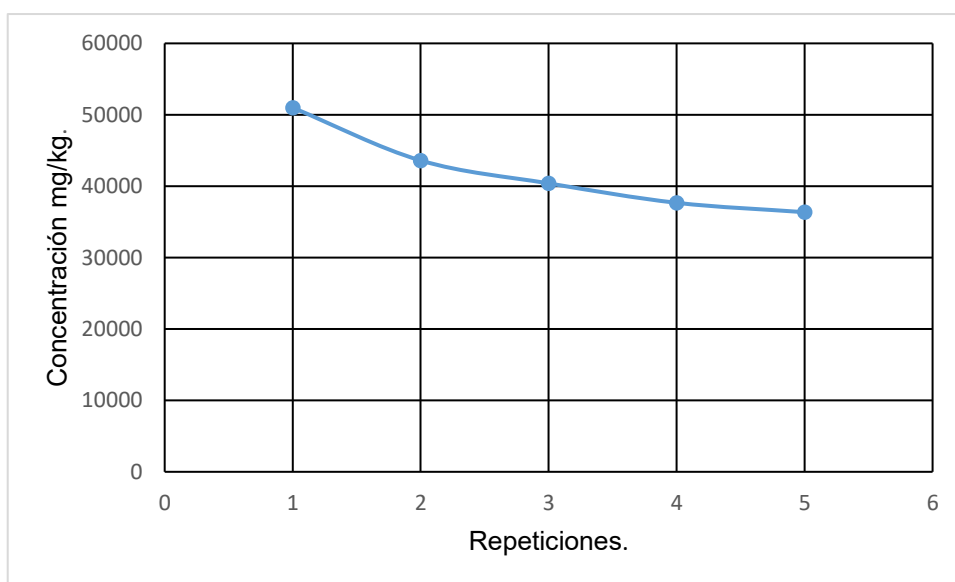


Figura 37: Tratamiento T2 al 20% de compost.

El tratamiento T2, con un 20% equivalente a 400 g de compost, comenzó con una concentración promedio de 50993,125 mg/kg. Durante los 50 días que duró el tratamiento, su concentración final fue de 36357,451 mg/kg, lo que indica que la gráfica sigue mostrando una disminución en la concentración.

En la figura 38 se evidencian los cambios de concentraciones que tuvieron lugar en el tratamiento T3.

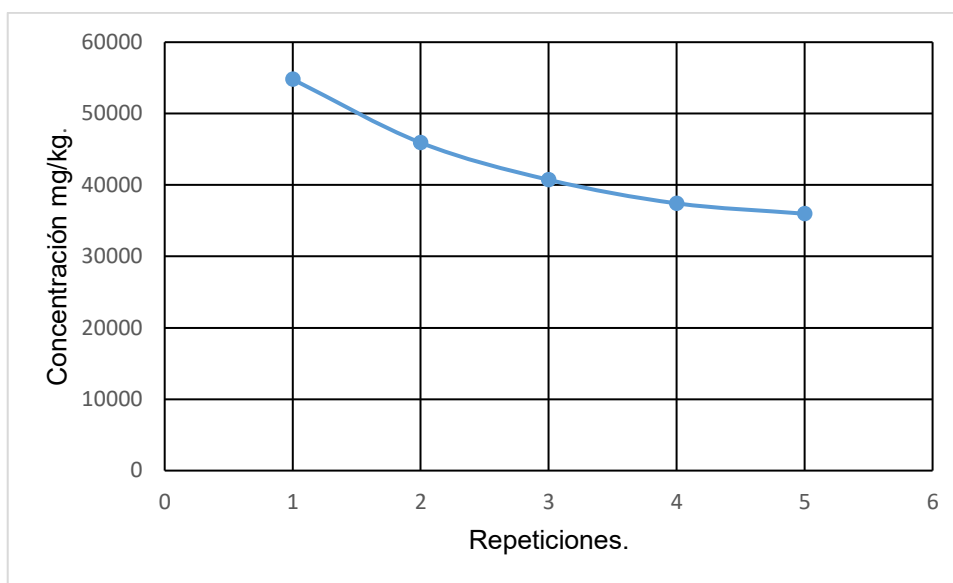


Figura 38: Tratamiento al 30% compost.

El tratamiento T3, con un 30% equivalente a 600 g de compost, comenzó con una concentración promedio de 54802,100 mg/kg. Durante los 50 días que duró el tratamiento, su concentración final fue de 35976,260 mg/kg, lo que indica que la gráfica sigue mostrando una disminución en la concentración.

Todas las muestras con las dosis de compost muestran alteraciones en los promedios finales, acelerando el proceso de degradación, a diferencia del tratamiento T0, que no presenta un gran cambio en la degradación.

Las muestras testigo iniciales presentaron una concentración promedio de 51737,022 mg/kg de hidrocarburos totales de petróleo (HTPs) en el suelo contaminado. Durante el periodo de 50 días del tratamiento, su concentración final se redujo ligeramente a 49509,434 mg/kg, lo que evidencia una degradación mínima de los HTPs en comparación con otros tratamientos evaluados.

El tratamiento T1, con una concentración del 10% de compost, inició con un promedio de 57.895,336 mg/kg de hidrocarburos totales de petróleo (HTPs) en el suelo contaminado. Tras un periodo de 50 días, la concentración final disminuyó a 34010,911 mg/kg, evidenciando que este fue el tratamiento con la mayor capacidad de degradación de HTPs en comparación con los tratamientos T2 y T3.

Todas las muestras presentan una tendencia decreciente, pero las que muestran una mayor degradación de HTPs son las que se aplicaron con compost como alternativa de biorremediación, como se observa en la figura 39.

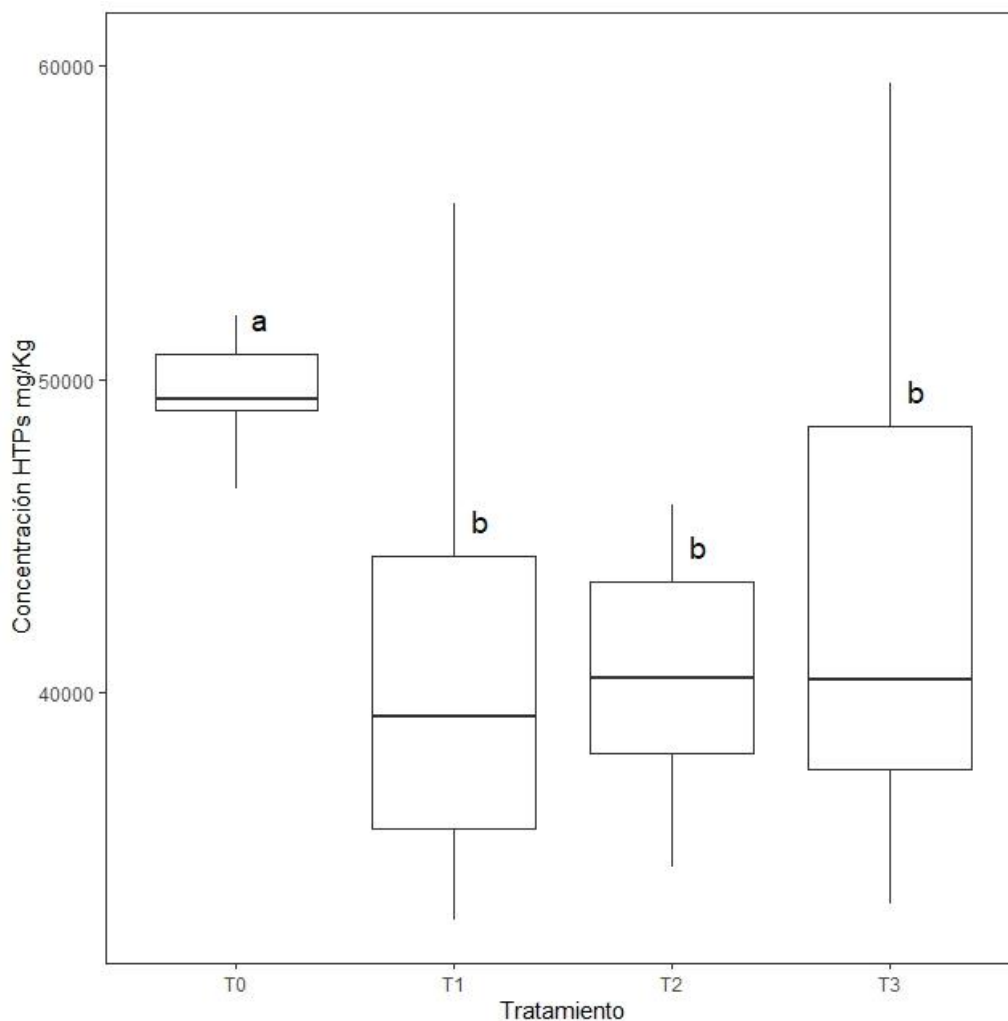


Figura 39: Concentración de HTPs por cada tratamiento en mg/kg de suelo.

La representación gráfica de cajas correspondiente a los diferentes tratamientos analizados durante el periodo de biorremediación revela, que existe una diferencia estadísticamente significativa, al comparar el tratamiento T0 (testigo) con los tratamientos T1, T2 y T3. En particular, la muestra testigo T0 obtuvo la menor capacidad de degradación de HTPs, mientras que los tratamientos T1, T2 y T3 que incorporaron compost en concentraciones del 10%, 20% y 30%, respectivamente, no presentan diferencias estadísticas significativas entre sí, lo que sugiere que el incremento de la dosis de compost más allá del 10% no aporta una mejora sustancial en la degradación del contaminante.

El rango intercuartílico representado en el gráfico de cajas para el T0, es estrecho y sugiere poca variabilidad entre las repeticiones; esto indica que la degradación del contaminante fue mínima y que apenas hubo cambios significativos en el suelo contaminado sin la presencia de compost debido a la limitada acción de los procesos naturales de biorremediación.

La mediana de las concentraciones en las muestras tratadas con compost se encuentra en torno a los 40.000 mg/kg, lo cual evidencia una tendencia positiva hacia la degradación del contaminante. En términos de eficacia, la figura 39 generada en RStudio. En el tratamiento T1, los

bigotes de la gráfica de cajas se extienden desde 57.000 mg/kg, el valor más alto, hasta 34.000 mg/kg, que representa el valor más bajo en comparación con los demás tratamientos.

4.6 Análisis estadísticos

Esta técnica estadística se utiliza para comparar las medias de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellas. Se aplicaron los resultados de este trabajo de biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos para determinar si las diferencias observadas son aleatorias o si reflejan un efecto real.

4.6.1 Hipótesis

H0: La aplicación de compost no tiene un efecto significativo en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

H1: La aplicación de compost mejora significativamente la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.

$F_{tab} > F_{cal}$ Acepta Ho

$F_{cal} > F_{tab}$ Acepta H1

En la tabla 16 muestra un resumen de la información de los diferentes tratamientos como es la suma, promedio y varianza.

Tabla 16: Resumen datos de varianza.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Tratamiento T0	15	751842,19	50122,8127	4283066,62
Tratamiento T1	15	632638,92	42175,928	79478809,4
Tratamiento T2	15	627061,23	41804,082	42923437,5
Tratamiento T3	15	644603,67	42973,578	56776431,2

En la tabla 16 se encuentra la información necesaria para realizar la prueba Post-Hoc de Tukey y comprobar si existen diferencias significativas entre las medias. De igual manera, la tabla 17 proporciona información que ayudará a comprobar las diferencias entre los tratamientos.

Tabla 17: Análisis de varianza.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	696030180	3	232010060	5,05849458	0,0035943	2,76943093
Dentro de los grupos	2568464425	56	45865436,2			
Total	3264494605	59				

F= 5,058 esto sugiere que la diferencia entre los grupos existe en comparación con las diferencias dentro de los grupos.

F valor crítico= 2,76 este valor es menor por lo que se rechazaría la hipótesis nula y se aceptaría que el compost tiene un efecto significativo sobre la regeneración del suelo.

4.6.2 Prueba de Post-Hoc de Tukey

El análisis Post-Hoc de Tukey se realizó con los datos del análisis de varianza (ANOVA) para verificar las diferencias significativas. En la tabla 18 se muestran las restas de las medias de los diferentes tratamientos.

Tabla 18: Resta de los promedios de los tratamientos.

	Promedio T0.	Promedio T1.	Promedio T2.	Promedio T3.
Resta.	50122,81267	42175,928	41804,082	42973,578
50122,81267	0			
42175,928	7946,884667	0		
41804,082	8318,730667	371,846	0	
42973,578	7149,234667	797,65	1169,496	0

Con la obtención de los resultados de las restas de las medias, se compararon con el resultado de HSD de la tabla de Tukey, donde se muestra en la tabla 18 que se utilizó un valor de probabilidad de 0.05 y, como multiplicador, el cuartil de la distribución Tukey, con un valor de 3,76, según la tabla. Para obtener el valor de HSD, se aplicó la siguiente fórmula:

$$HSD = \alpha \left(\sqrt{\frac{MSe}{n}} \right)$$

Tabla 19: Prueba de Tukey.

Datos.	Cálculos.
Multiplicador	3,76
Mse	45865436,2
n	15
HSD	6574,83683

En la tabla 19 se observan los valores que se reemplazaron en la fórmula, donde (Mse) es el valor obtenido al dividir la varianza dentro de los grupos entre los grados de libertad, y (n) es el valor de la cuenta o tamaño de la muestra.

4.6.3 Diferencias entre medias

Para este procedimiento se realizó con las medias de los 4 tratamientos:

T0: 50122,81

T1: 42175,93

T2: 41804,08

T3: 42973,58

Se calculó las diferencias absolutas entre cada par de medias para compararlas con el HSD y de esta manera comprobar en donde existe y no existe diferencia significativa.

T0 vs T1:

$$50122,81 - 42175,93 = 7946,88$$

Como ($7946,88 > 6574,81$), hay una diferencia significativa.

T0 vs T2:

$$50122,81 - 41804,08 = 8318,73$$

Como ($8318,73 > 6574,81$), hay una diferencia significativa.

T0 vs T3:

$$50122,81 - 42973,58 = 7149,23$$

Como ($7149,23 > 6574,81$), hay una diferencia significativa.

T1 vs T2:

$$42175,93 - 41804,08 = 371,85$$

Como ($371,85 < 6574,81$), no hay una diferencia significativa.

T1 vs T3:

$$42973,58 - 42175,93 = 797,65$$

Como ($797,65 < 6574,81$), no hay una diferencia significativa.

T2 vs T3:

$$42973,58 - 41804,08 = 1169,50$$

Como ($1169,50 < 6574,81$), no hay una diferencia significativa.

T0 muestra diferencias significativas en comparación con T1, T2 y T3.

No hay diferencias significativas entre T1, T2 y T3.

Estos resultados sugieren que el tratamiento de control T0 mostró un comportamiento notablemente distinto en comparación con los otros tratamientos, lo cual respalda la idea de que hubo pocas mejoras en la degradación del contaminante en este grupo.

4.7 Discusión

A partir de los hallazgos encontrados, se acepta la hipótesis alternativa general, que establece que existe relaciones de dependencia entre la variable independiente y dependiente: la cantidad de compost aplicado y la concentración de hidrocarburos en el suelo. Estableciendo que, en los procesos de biorremediación, el compost aplicado en las diferentes dosis y su composición de las comunidades microbianas, permiten una efectiva descomposición de contaminantes como el petróleo y sus derivados, gracias a la adaptabilidad y flexibilidad metabólica de los microorganismos presentes en él.

Según los resultados obtenidos en el presente estudio, las muestras que recibieron un compost del 10 % lograron una eficiencia del 41,25 % en la descomposición de hidrocarburos, los tratamientos que se aplicó compost como es el T1, T2 y T3 no existe una diferencia significativa entre estos tratamientos, mientras que el grupo de control (sin compost) solo alcanzo un 5 % de reducción en comparación, estos hallazgos se asemejan con lo observado en las investigaciones de Luigui y Paredes (2022), las dosificaciones de biosólidos compostados de los tratamientos "B" (20%BP+80%SC) y "C" (30%BP+70%SC) fueron las más óptima, ya que se evidenciaron reducciones de hasta un 36,3% de la concentración de hidrocarburos totales de petróleo en el tiempo de 65 días que ha durado la biorremediación en este estudio.

Por otro lado, el estudio de Espíritu Canchari y Guerreros Gutierrez (2022). aplicando vermicompost, obtuvo una aceleración de degradación de hidrocarburos baja, alcanzando un porcentaje del 30,56% en el suelo contaminado con 3% de petróleo, y del 7,75% en el suelo contaminado con 6% de petróleo, respecto a sus concentraciones iniciales, que fueron 14774,951 y 22723,875 mg/kg en donde el tiempo de duración de la biorremediación fueron de 62 días para este estudio, en comparación con las muestras T2 al 20% de compost que obtuvo un porcentaje de degradación del 28,70 de HTPs.

Bustamante Cabrera y Silva Ora (2019) analizaron el impacto de la materia orgánica en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios. Para ello, se implementó la aplicación de cachaza de caña de azúcar, compost y cascarilla de arroz como agentes de remediación. Los resultados mostraron que la cachaza de caña de azúcar y el compost aceleraron el proceso de biorremediación, logrando niveles bajos de toxicidad a los 60 días con cachaza y a los 90 días con compost. En particular, la cachaza alcanzó una eficiencia de biorremediación del 70.48 % a los 90 días, en comparación con el tratamiento T3 con un 30% de compost obtuvo una eficiencia correspondiente de porcentaje de degradación de 34,35% del contaminante.

La investigación realizada por Tarazona-Ocampo et al. (2020) y Alanya de la Cruz y Clemente Huamán (2022), quienes analizaron la recuperación de suelos degradados por vertimiento de petróleo crudo, a partir del uso de colonias bacterianas presentes en el estiércol de gallinas blancas de la cepa *leghorn*, obteniendo un porcentaje de remoción de 97,4 %. Mientras que el uso del estiércol de "*Bos Taurus*" y aserrín "*Polylepis*" obtuvo una eficiencia correspondiente al 8,06 %

donde las colonias bacterianas que habitan esta materia descompuesta como el estiércol y microorganismos en el compost ayudan a acelerar la degradación de contaminantes como los hidrocarburos.

Dado que el compostaje es un proceso biológico, es fundamental asegurar que parámetros clave, como el tamaño de las partículas, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de oxígeno y el nivel de humedad se mantengan dentro de los rangos óptimos. Estas condiciones favorecen un compostaje eficiente y, en consecuencia, potencian la biorremediación del suelo. Este enfoque coincide con los hallazgos de Lin et al. (2022) y Kästner y Miltner (2016), quienes destacan la importancia de controlar estos factores para lograr una degradación efectiva de contaminantes.

Al emplear compost en la restauración natural de terrenos contaminados por HTPs ha sido probado como una técnica efectiva gracias a la presencia de microorganismos capaces de descomponer compuestos derivados del petróleo que contiene en su interior. Estos microorganismos, aceleran la descomposición de agentes contaminantes como los metales pesados y su eficacia está directamente relacionada a la cantidad aplicada en cada tratamiento realizado. En general, a medida que se aumenta la proporción de compost agregada, el proceso de recuperación biológica resultará más rápido y eficaz (Das y Adholeya, 2012).

Con los resultados de las investigaciones donde se ha implementado compost y también residuos orgánicos, vermicompost, el abono de gallina y "*Bos Taurus*" para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos han obtenido resultados positivos en donde se ha logrado reducir cantidades mayores a la de suelos sin tratar. Esto demuestra que los microorganismos desempeñan un papel fundamental en la degradación de los hidrocarburos.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

Las concentraciones iniciales de contaminantes de HTPs en el suelo variaron entre las diferentes muestras, presentando valores promedio específicos para cada tratamiento: T0 con 51637,022 mg/kg, T1 con 57895,336 mg/kg, T2 con 50933,125 mg/kg y T3 con 54802,1 mg/kg. Estas diferencias destacan la variabilidad en las concentraciones iniciales registradas.

La fase experimental permitió evaluar los cambios producidos por las diferentes concentraciones de compost en la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, utilizando cuatro tratamientos: un testigo (T0) con 0% de compost y tres niveles de concentración de compost, T1 con 10%, T2 con 20% y T3 con 30%. Estos tratamientos brindaron un marco para analizar el efecto del compost en la mejora del suelo contaminado.

El tratamiento con la aplicación de compost al 10% demostró ser el más eficaz para la degradación de hidrocarburos en el suelo, logrando una reducción del 41,25% de la concentración inicial 57895,336 mg/kg a 34010,911 mg/kg. Por su parte, el tratamiento T3, con un 30% de compost, fue el segundo más efectivo, alcanzando una degradación del 34,35% y reduciendo la concentración inicial 54802,100 mg/kg a 35976,260 mg/kg. Estos resultados evidencian la efectividad del compost en la degradación de hidrocarburos.

La muestra T0 (testigo) tuvo una degradación de hidrocarburos mínima de la concentración inicial 51637,022 mg/kg a 49509,434 mg/kg, de esta manera se pudo verificar la efectividad de los tratamientos que se aplicaron compost. Además, el análisis de varianza y la prueba de Post-Hoc de Tukey confirmaron diferencia existente entre las muestras T0 testigo y los tratamientos con compost T1, T2 y T3, destacando así la superioridad de estos últimos en la degradación de hidrocarburos en el suelo.

El análisis realizado mediante el programa estadístico Rstudio mostró que los tratamientos T1, T2 y T3 no hubo una diferencia, pero si con las muestras T0 donde existe diferencia significativa en la disminución de HTPs.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda priorizar la implementación de métodos regenerativos y ambientalmente amigables, como la aplicación de compost y la acción de microorganismos, para la remediación de suelos contaminados. Estos enfoques minimizan el riesgo de causar daños secundarios al entorno, constituyendo una alternativa más sostenible y segura frente a tecnologías convencionales como la excavación o el empleo de productos químicos.

Es recomendable implementar la aplicación de compost en combinación con enmiendas microbianas para optimizar la degradación de hidrocarburos en el suelo. Este enfoque permitiría la incorporación de microorganismos y bacterias específicas que potencien los procesos bioquímicos responsables de la degradación, maximizando la eficacia del tratamiento y promoviendo una biorremediación más acelerada y eficiente.

Se recomienda realizar comparaciones sistemáticas entre el uso de compost y otros métodos de biorremediación, como la fitorremediación y la remediación biológica con aceites esenciales o enzimas. Este análisis permitiría evaluar tanto la eficacia como la sostenibilidad de cada técnica, proporcionando información clave para seleccionar el método más adecuado según las características específicas del suelo contaminado y los objetivos del proceso de remediación.

Se factible realizar estudios a largo plazo para evaluar el comportamiento del suelo después de la remediación con compost, centrándose en su capacidad para retener nutrientes y soportar el desarrollo de cultivos. Este análisis permitiría determinar los efectos sostenibles de la remediación con compost, optimizando las prácticas agrícolas y garantizando la restauración integral de la calidad del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, A; Pucci, G; Morales, MJ; Pucci, O. 2010. Biodegradación de petróleo y sus derivados por la comunidad bacteriana en un suelo de la Patagonia Argentina (en línea). *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología* 30(1):29-36. Consultado 2 may 2025. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562010000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Alanya de la Cruz y Clemente Huamán. 2022. Uso de estiércol bos taurus y aserrín polylepis para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo en la ciudad de Huancavelica, 2021 (en línea). Huancavelica, Universidad Nacional de Huancavelica. 1-129 p. Consultado 29 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.unh.edu.pe/items/fa6480a9-22b7-49af-9a3b-3cd775065dc1>.
- Amundson, R; Berhe, AA; Hopmans, JW; Olson, C; Sztein, AE; Sparks, DL. 2015. Soil and human security in the 21st century (en línea). *Science* 348(6235). DOI: https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1261071/ASSET/B26B4A15-8B7A-4343-9A7E-905AFB9848F4/ASSETS/GRAPHIC/348_1261071_FA.JPEG.
- Arias, JAV; Arias, JAV. 2017. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación (en línea). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 8(1):151-167. DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>.
- Azim, K; Soudi, B; Boukhari, S; Perissol, C; Roussos, S; Thami Alami, I. 2018. Composting parameters and compost quality: a literature review (en línea). *Organic Agriculture* 8(2):141-158. DOI: <https://doi.org/10.1007/S13165-017-0180-Z/METRICS>.
- Barbieri, M. 2017. The importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to evaluate the soil contamination (en línea). *JOURNAL OF GEOLOGY & GEOPHYSICS* 5(1):1-4. DOI: <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>.
- Becerra, S; Paichard, E; sturma, A; Maurice, L. 2013. Vivir con la contaminación petrolera en el Ecuador: percepciones sociales del riesgo sanitario y capacidad de respuesta (en línea). *Revista LIDER* 15(23):102-120. Consultado 1 may 2025. Disponible en <https://revistaliderchile.ulagos.cl/index.php/liderchile/article/view/2396>.
- Bendix, J; Behling, H; Peters, T; Richter, M; Beck, E. 2010. Functional biodiversity and climate change along an altitudinal gradient in a tropical mountain rainforest (en línea). *Environmental Science and Engineering* :239-268. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-00493-3_11.
- Bernal, MP; Sommer, SG; Chadwick, D; Qing, C; Guoxue, L; Michel, FC. 2017. Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits (en línea). *Advances in Agronomy* 144:143-233. DOI: <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2017.03.002>.
- Bezdicek, DF; Papendick, RI; Lal, R. 2015. Introduction: Importance of soil quality to health and sustainable land management (en línea). *Methods for Assessing Soil Quality* :1-8. DOI: <https://doi.org/10.2136/SSASPEC.PUB49.INTRODUCTION;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;JOURNAL:JOURNAL:5171;CTYPE:STRING:BOOK>.
- Burbano-Orjuela, H. 2016. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria (en línea). *Revista de Ciencias Agrícolas* 33(2):117-124. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>.
- Bustamante Cabrera, G; Silva Ora, JS. 2019. Efecto de la materia orgánica en la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo en establecimientos de servicios (en línea). Lambayeque, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. 1-66 p. Consultado 26 may 2025. Disponible en <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/4643>.

- Calderón-Medina, CL; Bautista-Mantilla, GP; Rojas-González, S; Calderón-Medina, CL; Bautista-Mantilla, GP; Rojas-González, S. 2018. Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta (en línea). *ORINOQUIA* 22(2):141-157. DOI: <https://doi.org/10.22579/20112629.524>.
- Cando Rodríguez, MÁ. 2011. Determinación y análisis de un proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos (en línea). Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana. 1-196 p. Consultado 29 abr. 2025. Disponible en <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1520>.
- Cano, MA. 2011. INTERACCIÓN DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN PLANTAS: Micorrizas, Trichoderma spp. y Pseudomonas spp. UNA REVISIÓN (en línea). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 14(2):15-31. Consultado 15 mar. 2025. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262011000200003&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- Cavazos-Arroyo, J; Pérez-Armendáriz, B; Mauricio-Gutiérrez, A. 2014. Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México (en línea). *Agricultura, sociedad y desarrollo* 11(4):539-550. Consultado 5 may 2025. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722014000400006&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Cevallos Aguilar, AI. 2013. Análisis del impacto financiero y económico en la industria petrolera de campos marginales en el Ecuador por efectos de las renegociaciones de los contratos con el estado ecuatoriano en el año 2011 (en línea). Quito, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 1-198 p. Consultado 5 may 2025. Disponible en <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/15799>.
- Cobos Cajamarca, K V. 2023. Calidad de compost a partir de residuos agropecuarios con el método Takakura, y su efecto en el desarrollo de la planta de maíz en su fase inicial. Cuenca, Universidad Católica de Cuenca. 1-80 p. Consultado 6 may 2025. Disponible en <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/13883>
- Cortés Llerena, CF. 2017. Técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados por oleoductos (en línea). Quito, Escuela Politécnica Nacional. 1-139 p. Consultado 2 may 2025. Disponible en <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18837>. Disponible en <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/13883>
- Cunningham, CJ; Kuyukina, MS; Ivshina, IB; Konev, AI; Peshkur, TA; Knapp, CW. 2020. Potential risks of antibiotic resistant bacteria and genes in bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils (en línea). *Environmental Science: Processes & Impacts* 22(5):1110-1124. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9EM00606K>.
- Das, M; Adholeya, A. 2012. Role of Microorganisms in Remediation of Contaminated Soil (en línea). *Microorganisms in Environmental Management: Microbes and Environment* 9789400722293:81-111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-2229-3_4.
- De, A; Mora-Covarrubias, LA; Vázquez-González, FJ; José Valero-Galván, Y. 2016. Sucesión bacteriana del género Bacillus en el proceso de compostaje y lombricompostaje con diferentes fuentes de estiércol (en línea). *TECNOCENCIA Chihuahua* 10(1):23-31. DOI: <https://doi.org/10.54167/TCH.V10I1.582>.
- Escobar-Alvarado, LF; Vaca-Mier, M; López, R; Rojas-Valencia, MN. 2018. Hydrocarbon Degradation and Lead Solubility in a Soil Polluted with Lead and Used Motor Oil Treated by Composting and Phytoremediation (en línea). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 100(2):280-285. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00128-017-2211-6/METRICS>.
- Espíritu Canchari, WR; Guerreros Gutierrez, L. 2022. Efecto del vermicompost en un suelo contaminado con hidrocarburos y crecimiento de rabanito (*Raphanus sativus* L.), Daniel A. Carrión, Pasco - 2021 (en línea). Universidad Continental. Consultado 6 may 2025. Disponible en <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11473>.
- Ezeah, C; Osuagwu, JC; Adesiyun, IM. 2023. Design principles of sustainable composting and

- recovery of value from compost. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Advances in Composting and Vermicomposting Technology* :143-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91874-9.00008-5>.
- Ferreira, TC; Nascimento, DO; Jorge, F; Oliveira, S; Pessoa, F; França, DE. 2013. BIORREMEDIAÇÃO DE UN SUELO TROPICAL CONTAMINADO CON RESIDUOS ACEITOSOS INTEMPERIZADOS (en línea). *Revista internacional de contaminación ambiental* 29(1):21-28. Consultado 5 may 2025. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992013000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Finer, M; Babbitt, B; Novoa, S; Ferrarese, F; Pappalardo, S; DE MARCHI, M; Saucedo, M; Kumar, A. 2017. El futuro del desarrollo de petróleo y gas en la Amazonía occidental (en línea). *Research* :11-18. Consultado 5 may 2025. Disponible en <https://www.research.unipd.it/handle/11577/3195152>.
- Gabriela Pérez Naranjo, C; Maurice, L; Ochoa-Herrera, V; López, F; Egas, DA; Lagane, C; Besson, P; Zambrano, C. 2015. Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador (en línea). *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* 7(2):95-115. DOI: <https://doi.org/10.18272/ACI.V7I2.271>.
- Gabriels, D; L., DL. 2006. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo (en línea). *Venezuelas* 14(1):37-48. Consultado 1 may 2025. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/982.
- García Izquierdo, C; Moreno-Ortego, JL; Ho Fernández, MT; Polo, A. 2002. Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo (en línea). 2. Jornadas Científicas sobre Medio Ambiente. Madrid (España). 16-17 Abr 2002. Consultado 29 abr. 2025. Disponible en <https://digital.csic.es/handle/10261/111812>.
- García, Y; Ramírez, W; Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso (en línea). *Pastos y Forrajes* 35(2):125-138. Consultado 29 abr. 2025. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Haghollahi, A; Fazaelpoor, MH; Schaffie, M. 2016. The effect of soil type on the bioremediation of petroleum contaminated soils (en línea). *Journal of Environmental Management* 180:197-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.05.038>.
- Halasz, AM; Van Tra, H; Ouellette, D; Pontbriand, Y. 1995. Determination of petroleum hydrocarbons in soil: SFE versus soxhlet and water effect on recovery (en línea). *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 60(2-4):123-137. DOI: <https://doi.org/10.1080/03067319508042870>; WEBSITE:WEBSITE:TFOPB;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION.
- Hartemink, AE. 2016. The definition of soil since the early 1800s (en línea). *Advances in Agronomy* 137:73-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2015.12.001>.
- Hernández Valencia, I; Navas, G; Infante, C; Hernández Valencia, I; Navas, G; Infante, C. 2017. FITORREMEDIAÇÃO DE UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO EXTRA PESADO CON *Megathyrus maximus* (en línea). *Revista internacional de contaminación ambiental* 33(3):495-503. DOI: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.12>.
- Ho, TTK; Tra, VT; Le, TH; Nguyen, NKQ; Tran, CS; Nguyen, PT; Vo, TDH; Thai, VN; Bui, XT. 2022. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity (en línea). *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 6:100211. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2022.100211>.
- Hugo, B; Mijanur, RKM. 2016. Effects of crude oil pollution in the tropical rainforest biodiversity of Ecuadorian Amazon Region (en línea). *J. Bio. Env. Sci* 2016(2):249-254. Consultado 5 may 2025. Disponible en <http://www.innspub.net>.

- Kästner, M; Miltner, A. 2016. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil (en línea). *Applied Microbiology and Biotechnology* 2016 100:8 100(8):3433-3449. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00253-016-7378-Y>.
- Kebede, G; Tafese, T; Abda, EM; Kamaraj, M; Assefa, F. 2021. Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts (en línea). *Journal of Chemistry* 2021(1):9823362. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9823362>.
- Kopittke, PM; Menzies, NW; Wang, P; McKenna, BA; Lombi, E. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security (en línea). *Environment International* 132:105078. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.105078>.
- Lehmann, J; Bossio, DA; Kögel-Knabner, I; Rillig, MC. 2020. The concept and future prospects of soil health (en línea). *Nature Reviews Earth and Environment* 1(10):544-553. DOI: <https://doi.org/10.1038/S43017-020-0080-8>;SUBJMETA=172,47,685,704,844;KWRD=BIOGEOCHEMISTRY,ENVIRONMENTAL+SCIENCES,SUSTAINABILITY.
- Lin, C; Cheruiyot, NK; Bui, X-T; Huu, &; Ngo, H; Kiprotich Cheruiyot, N; Ngo, HH. 2022. Composting and its application in bioremediation of organic contaminants (en línea). *Bioengineered* 13(1):1073-1089. DOI: <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2017624>.
- Luigui, C; Paredes, D. 2022. Biorremediación de suelos contaminados por diésel mediante el aprovechamiento de los biosólidos compostados por la empresa Ecothani S. A. C., Cusco - 2021 (en línea). Universidad Continental. Consultado 29 abr. 2025. Disponible en <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12238>.
- Martínez-Arévalo, J V.; Sacbaja-Galindo, OA; Prado-Córdova, JP. 2014. Conocimiento de la composición química del suelo en áreas de sucesión ecológica de bosques de abeto (en línea). *Ra Ximhai* 10(3):161-173. Consultado 6 may 2025. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46131111012>.
- Mayorga-Mayorga, , Henry Santiago; Reyes-Bueno, F; Mayorga-Mayorga, , Henry Santiago; Reyes-Bueno, F. 2022. Análisis de Derrames de Petróleo en el Campo Ancón Mediante Sistemas de Información Geográfica (en línea). *Revista Politécnica* 49(1):53-60. DOI: <https://doi.org/10.33333/RP.VOL49N1.05>.
- Mogollón, JP; Torres, D; Martínez, A. 2010. Cambios en algunas propiedades biológicas del suelo según el uso de la tierra en el sector el cebollal, Estado Falcón, Venezuela (en línea). *Bioagro* 22(3):217-222. Consultado 1 may 2025. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612010000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Molano, KDS; Tapia, LV. 2023. Una propuesta de análisis sistémico para la selección de tecnologías para remediación de suelos a partir de un análisis multicriterio (en línea). *Ingeniería y Región* 29:5-19. DOI: <https://doi.org/10.25054/22161325.3964>.
- Möller, K; Schultheiß, U. 2015. Chemical characterization of commercial organic fertilizers (en línea). *Archives of Agronomy and Soil Science* 61(7):989-1012. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.978763>.
- Pardo, IMG; Rodríguez, JMM; Díaz, AMS. 2020. Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico. Editorial AGROSAVIA :1-63. DOI: <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.NBOOK.7404098>.
- Paspuel Revelo Lenin. 2002. La conservación y uso sustentable de la biodiversidad en el Ecuador (en línea). Quito, Instituto de los Altos Estudios Nacionales. 1-195 p. Consultado 5 may 2025. Disponible en <http://repositorio.iaen.edu.ec/handle/24000/6322>.
- Pastor Mogollón, J; Martínez, A; Torres, D. 2016. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE VERMICOMPOST EN LAS PROPIEDADES BIOLÓGICAS DE UN SUELO SALINO-SÓDICO DEL SEMIÁRIDO VENEZOLANO (en línea). *Bioagro* 28(1):029-038. Consultado 30 abr. 2025.

Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612016000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

- Pons-Jiménez, M; Guerrero-Peña, A; Zavala-Cruz, J; Alarcón, A. 2011. Removal of oil and petroleum compounds from soils with different physical and chemical characteristics (en línea). *Universidad y ciencia* 27(1):1-15. Consultado 2 may 2025. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792011000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Ren, X; Zeng, G; Tang, L; Wang, J; Wan, J; Wang, J; Deng, Y; Liu, Y; Peng, B. 2018. The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation (en línea). *Waste Management* 72:138-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.11.032>.
- Reyes, O; Sánchez, L; Reyes, O; Sánchez, L. 2016. La demanda de gasolinas, gas licuado de petróleo y electricidad en el Ecuador: elementos para una reforma fiscal ambiental (en línea). *EconPapers*. Consultado 1 may 2025. Disponible en <https://EconPapers.repec.org/RePEc:ecr:col022:40629>.
- Rivera-Parra, JL; Vizcarra, C; Mora, K; Mayorga, H; Dueñas, JC. 2020. Spatial distribution of oil spills in the north eastern Ecuadorian Amazon: A comprehensive review of possible threats (en línea). *Biological Conservation* 252:108820. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2020.108820>.
- Rodríguez, WÁG. 2023. Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado (en línea). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 7(2):6908-6927. DOI: https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V7I2.5834.
- Rojas Jaramillo, CG. 2015. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE UN NUEVO ESQUEMA DE IMPORTACIÓN DE GLP (GAS LICUADO DE PETRÓLEO) PARA EL ECUADOR (online). Quito, Universidad Internacional SEK. 1–102 p. Consultado 13 May 2025. Available at <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/1857>.
- Rosales Aranda, RM. 2013. Detección y evaluación de la contaminación del suelo por tanques enterrados de almacenamiento de hidrocarburos en estaciones de servicio. Cartagena, Universidad Politecnica de Cartagena. Consultado 1 may 2025. Disponible en <https://doi.org/10.36390/telos263.11>.
- Rozo, C; Dussán, J. 2010. Análisis de transferencia horizontal de genes en ensayos de biorremediación con grasas recalcitrantes (en línea). *Revista Colombiana de Biotecnología* 12(1):22-31. Consultado 6 may 2025. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752010000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- Salvador-Adriano, M; Ortiz-Villalobos, I; Velázquez-Ovalle, G; Salvador-Figueroa, M; Salgado-Mora, MG; Adriano-Anaya, L. 2024. Características químicas y biológicas del suelo con manejo orgánico y cultivado con papaya (*Carica papaya* L) (en línea). *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 7(3):e71559-e71559. DOI: <https://doi.org/10.34188/BJAERV7N3-033>.
- Sayara, T; Sánchez, A. 2020. Bioremediation of PAH-Contaminated Soils: Process Enhancement through Composting/Compost (en línea). *Applied Sciences* 10(11):3684. DOI: <https://doi.org/10.3390/APP10113684>.
- Sharma, S; Tiwari, S; Hasan, A; Saxena, V; Pandey, LM. 2018. Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils (en línea). *3 Biotech* 2018 8:4 8(4):1-18. DOI: <https://doi.org/10.1007/S13205-018-1237-8>.
- Sheoran, V; Sheoran, AS; Poonam, P. 2008. Remediation techniques for contaminated soils (en línea). *Environmental Engineering and Management Journal* 7(4):379. DOI: <https://doi.org/10.30638/EEMJ.2008.054>.

- Simbaña Cazar, CJ. 2016. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos de la Parroquia Taracoa en Francisco de Orellana, mediante el Hongo pleurotus ostreatus. (en línea). Riobamba, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 1-97 p. Consultado 7 may 2025. Disponible en <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/4916>.
- Song, XY; Liu, YT; Jiang, XE; -, al; Umer Shafiq, M; Khaled Ben Mahmud, H; Rezaee, R; Khaled Ben Mahmud -, H; Al-Rubaye, AH; Jasim, DJ; Fateh Ameen, HM; Aziz Al-Robai, H; Al-Assal, JR. 2023. The Impacts of Petroleum on Environment (en línea). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1158(3):032014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1158/3/032014>.
- Tanya, N; Cevallos Paguay, C; Darío, J; Díaz, G. 2018. Evaluación de la biodegradación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando Aspergillus niger, Pleurotus ostreatus y Pseudomonas aeruginosa (en línea). Quito, Universidad Politécnica Salesiana. . Consultado 2 may 2025. Disponible en <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15681>.
- Tarazona-Ocampo, J; Soto-Delgado, A; Arias-Salcedo, R. 2020. Tratamientos biológicos y físicos en la recuperación de suelos contaminados por petróleo crudo (en línea). Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo 6(1):1-11. DOI: <https://doi.org/10.17162/RICTD.V6I1.1401>.
- ro Quezada, TQ; Viteri Escobar, CJ; Salcedo Muñoz, VE. 2024. Análisis de la dependencia petrolera en Ecuador periodo 2018-2022 (online). Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, ISSN-e 2343-5763, ISSN 1317-0570, Vol. 26, No. 3, 2024, págs. 958-974 26(3):958–974. DOI: <https://doi.org/10.36390/telos263.11>.
- Termorshuizen, AJ; Moolenaar, SW; Veecken, AHM; Blok, WJ. 2004. The value of compost (en línea). Reviews in Environmental Science and Biotechnology 3(4):343-347. DOI: <https://doi.org/10.1007/S11157-004-2333-2/METRICS>.
- Torres Ordóñez, MF. 2019. Percepción social respecto a suelos contaminados por hidrocarburos en la parroquia San Carlos, perteneciente al cantón Joya de los Sachas, provincia de Orellana, Ecuador (en línea). s.l., PUCE - Quito. Consultado 1 may 2025. Disponible en <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/21556>.
- Valentín, L; Nousiainen, A; Mikkonen, A. 2013. Introduction to Organic Contaminants in Soil: Concepts and Risks (en línea). Handbook of Environmental Chemistry 24:1-29. DOI: https://doi.org/10.1007/698_2012_208.
- Viera-Arroyo, WF. 2020. Rol de los microorganismos benéficos en la Agricultura Sustentable (en línea). Journal of the Selva Andina Biosphere 8(2):67-68. Consultado 7 may 2025. Disponible en <https://sar.lurawi.com/index.php/jsab/article/view/226>.
- Vizúete-García, RA; Pascual-Barrera, AE; Taco-Taco, CW; Morales-Padilla, MM; Vizúete-García, RA; Pascual-Barrera, AE; Taco-Taco, CW; Morales-Padilla, MM. 2020. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos (en línea). Revista Lasallista de Investigación 17(1):177-187. DOI: <https://doi.org/10.22507/RLI.V17N1A19>.
- Yagual Barzola, KR. 2020. Técnicas de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos aplicables en el cantón Salinas (en línea). La libertad, Universidad Estatal Península de Santa Elena. 1-120 p. Consultado 5 may 2025. Disponible en <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/5345>.

ANEXOS

Anexo 1: Evidencias fotográficas durante la elaboración del trabajo de biorremediación



Figura 40: Profundidad de 30cm para la obtención del suelo.



Figura 41: Área contaminada por derrame.



Figura 42: Trituración de suelo para análisis.



Figura 43: Resultado del alcohol metílico de la tercera repetición.



Figura 44: Se encontró gusano blanco en el último día de la biorremediación.



Figura 45: Recolección de muestras.

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, José Moisés Cárdenas Morocho portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105924344. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Biorremediación de suelos de la zona noreste de la amazonia ecuatoriana contaminados por hidrocarburos no volátiles aplicando compost en laboratorio” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de junio de 2025

F: 

José Moisés Cárdenas Morocho

0105924344