

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON  
HIDROCARBUROS DE LA EMPRESA HAZWAT**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**JOSÉ ALEJANDRO HEREDIA JAGUACO**

**[jose.heredia@epn.edu.ec](mailto:jose.heredia@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: Ing. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS MSc.**

**[lucia.montenegro@epn.edu.ec](mailto:lucia.montenegro@epn.edu.ec)**

**Distrito Metropolitano de Quito, agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, JOSÉ ALEJANDRO HEREDIA JAGUACO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

**JOSÉ ALEJANDRO HEREDIA JAGUACO**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOSÉ ALEJANDRO HEREDIA JAGUACO, bajo mi supervisión.

**Ing. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS MSc**

**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos, resultados del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional, sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponden a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo, observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JOSÉ ALEJANDRO HEREDIA JAGUACO

Ing. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS MSc.

## AUSPICIO

El presente trabajo de investigación contó con el auspicio de HAZWAT CRA, a través del convenio CV21-01-02, denominado: “Diseño de los procesos requeridos para eliminación, disposición final, reutilización de desechos contaminados (tóxicos y peligrosos) y no contaminados que maneja la empresa Hazwat”.

## DEDICATORIA

(Opcional)

## AGRADECIMIENTO

(Opcional)

## INDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIONES</b> .....	<b>i</b>
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	<b>ii</b>
<b>AUSPICIO</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABREVIATURAS Y SIGLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcance .....	3
1.4. Marco Teórico .....	5
1.4.1. Generación de desechos peligroso por la industria petrolera .....	6
1.4.2. Gestión de los desechos peligrosos con hidrocarburos .....	9
1.4.3. Bioestimulación de suelos contaminados con hidrocarburos .....	11
1.4.4. <i>Landfarming</i> de suelos contaminados con hidrocarburos .....	15
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>17</b>

2.1.	Muestreo en la empresa Hazwat.....	18
2.2.	Adecuación del sitio para el <i>Landfarming</i> .....	20
2.3.	Análisis de los suelos contaminados con hidrocarburos .....	22
2.3.1.	Identificación de microorganismos en suelos con hidrocarburos.....	23
2.3.2.	Conductividad eléctrica del suelo con hidrocarburos.....	24
2.3.3.	pH del suelo con hidrocarburos .....	24
2.3.4.	Temperatura ambiente y humedad relativa del invernadero.....	24
2.3.5.	Contenido de humedad del suelo con hidrocarburos .....	25
2.3.6.	Caracterización física de suelos con hidrocarburos .....	25
2.3.7.	Potasio en suelos con hidrocarburos.....	25
2.3.8.	Fósforo total en suelos con hidrocarburos.....	26
2.3.9.	Nitrógeno Total Kjeldahl en suelos con hidrocarburos .....	26
2.3.10.	Hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en el suelo tratado.....	27
2.3.11.	Hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en lixiviados.....	27
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>28</b>
3.1.	Muestreo en la empresa Hazwat.....	28
3.2.	Análisis de los suelos contaminados con hidrocarburos .....	30
3.2.1.	Identificación de microorganismos en suelos con hidrocarburos.....	30
3.2.2.	Conductividad eléctrica del suelo con hidrocarburos.....	32
3.2.3.	pH del suelo con hidrocarburos .....	33
3.2.4.	Temperatura ambiente y humedad relativa del invernadero.....	34
3.2.5.	Contenido de humedad del suelo con hidrocarburos .....	36
3.2.6.	Caracterización física de suelos con hidrocarburos .....	38
3.2.7.	Potasio en suelos con hidrocarburos.....	39

3.2.8. Fósforo Total en suelos con hidrocarburos.....	40
3.2.9. Nitrógeno Total Kjeldahl en suelos con hidrocarburos .....	42
3.2.10. Hidrocarburos totales de petróleo en el suelo tratado .....	44
3.2.11. Hidrocarburos totales de petróleo en lixiviados .....	48
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>49</b>
4.1. Conclusiones.....	49
4.2. Recomendaciones .....	51
<b>5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>52</b>
<b>6. ANEXOS.....</b>	<b>63</b>
Anexo 1. Certificado de originalidad .....	63
Anexo 2. Métodos de análisis y procedimientos utilizados .....	64
Anexo 3. Conductividad eléctrica del suelo contaminado medida al inicio y al final del proceso de biorremediación.....	65
Anexo 4. pH del suelo contaminado de las hileras A y B durante el proceso de biorremediación .....	66
Anexo 5. Contenido de humedad promedio del suelo contaminado de las hileras A y B durante el proceso de biorremediación .....	67
Anexo 6. Criterios de Remedición o Restauración del suelo normado por el TULSMA .....	68
Anexo 7. Límites permisibles para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, según lo normado por el RAOHE .....	70
Anexo 8. Resultados de los ensayos físicos de los suelos contaminados realizados por el LEMSUR .....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Derrames de petróleo en el Ecuador.....	7
Tabla 2. Condiciones ambientales en la toma de muestra.....	19
Tabla 3. Variables del método de biorremediación de suelos para la hilera A.....	21
Tabla 4. Variables del método de biorremediación de suelos para la hilera B.....	21
Tabla 5. Parámetros analizados para las muestras de suelos.....	23
Tabla 6. Identificación y dosificación de las muestras para cada hilera.....	29
Tabla 7. Resultados de la identificación de microorganismos.....	31
Tabla 8. Resultados de la identificación de microorganismos (hongos).....	32
Tabla 9. Resultados de la granulometría del suelo contaminado con hidrocarburos de las hileras A y B.....	38
Tabla 10. Rendimiento de la degradación de TPH en suelos tratados de la hilera A	46
Tabla 11. Rendimiento de la degradación de TPH en suelos tratados de la hilera B	46
Tabla 12. Tabla 3 “Criterios de Remediación o Restauración del suelo” del TULSMA.....	47
Tabla AI. Métodos de análisis y procedimiento utilizados.....	64
Tabla AII. Conductividad eléctrica del suelo contaminado medida al inicio y al final del proceso de biorremediación.....	65
Tabla AIII. pH del suelo contaminado de las hileras A y B durante el proceso de biorremediación.....	66
Tabla AIV. Contenido de humedad promedio del suelo contaminado de la hilera A y B durante el proceso de biorremediación.....	67
Tabla AV. Criterios de Remediación o Restauración del suelo normado por el TULSMA.....	68

Tabla AVI. Límites permisibles para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, según lo normado por el RAOHE (Cabrera, 2013).....	70
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Afectación por el derrame en el Río Coca .....	8
Figura 2. Contaminación provocada por los pozos y estaciones de producción petrolera de la empresa Texaco en la región nororiental del Ecuador. ....	10
Figura 3. Biorremediación como tratamiento para suelos .....	12
Figura 4. Rutas metabólicas para biodegradar compuestos xenobióticos .....	13
Figura 5. Parámetros para evaluar la efectividad de la técnica de <i>Landfarming</i> . ....	16
Figura 6. Ubicación de la empresa Hazwat.....	18
Figura 7. Pilas de suelos contaminados con petróleo .....	19
Figura 8. Construcción del invernadero.....	20
Figura 9. a. Preparación del área de trabajo; b. Las submuestras adicionadas con cascarilla de arroz y fertilizante .....	21
Figura 10. Concentración de hidrocarburos totales de petróleo de las 5 muestras obtenidas en el muestreo en Hazwat .....	28
Figura 11. Resultados de la conductividad eléctrica en suelos contaminados con hidrocarburos. ....	32
Figura 12. pH del suelo contaminado con hidrocarburos de las hileras A y B en función del tiempo comparadas con los valores máximos permisibles normados por el TULSMA (2015).....	34
Figura 13. Monitoreo de la temperatura ambiente en el invernadero .....	35
Figura 14. Medidas de humedad relativa del invernadero.....	36
Figura 15. Contenido de humedad del suelo contaminado con hidrocarburos de la hilera A y B en función del tiempo comparadas con el valor recomendado .....	37
Figura 16. Concentración de potasio en los suelos contaminados de la hilera A.....	39
Figura 17. Concentración de potasio en los suelos contaminados de la hilera B.....	40

Figura 18. Concentración de fósforo en los suelos contaminados de la hilera A .....	41
Figura 19. Concentración de fósforo en los suelos contaminados de la hilera B .....	42
Figura 20. Concentración de nitrógeno en los suelos contaminados de la hilera A ..	43
Figura 21. Concentración de nitrógeno en los suelos contaminados de la hilera B ..	43
Figura 22. Concentración de TPH para la hilera A en comparación con el valor máximo permisible del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente .....	44
Figura 23. Concentración de TPH para la hilera B en comparación con el valor máximo permisible del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente .....	45
Figura 24. Concentración de TPH de la muestra 9 durante la biorremediación .....	47
Figura 25. Resultados de hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en lixiviados ...	48

## ABREVIATURAS Y SIGLAS

- TPH's:** Hidrocarburos Totales del Petróleo
- pH:** Potencial hidrógeno
- GAD's:** Gobiernos Autónomos Descentralizados de Ecuador
- SUCS:** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- IBC's:** Bulk Container y se los puede denominar también GRG o Gran Recipiente a Granel.
- INEN:** Instituto Ecuatoriano de Normalización
- SAE:** Servicio de Acreditación Ecuatoriano
- CICAM:** Centro de Investigación y Control Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional
- LEMSUR:** Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas de la Escuela Politécnica Nacional
- LDIA:** Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional
- NTE:** Norma Técnica Ecuatoriana
- TULSMA:** Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación curricular se realizó la biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos de una pila de 300 kg se usaron 54 kg separado en dos hileras A y B, siendo dosificados con 6 kg de suelo en cada uno y resultando un total de 9 muestras por hilera, variando cascarilla de arroz y abono orgánico, el resto, 246 kg constaba de material rocoso (81,3%) y piedras (18,7 %) provenientes de derrames de petróleo el cual fue descartado del proyecto, los suelos estaban almacenados en la empresa Hazwat.

La biorremediación se llevó a cabo en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional, en el edificio 10 de Hidráulica, donde se construyó un invernadero para poder ajustar las condiciones ambientales, con una humedad relativa que oscilaba entre 60 % y 80 % y temperatura entre 20 y 40 °C.

El proceso de biorremediación tuvo una duración de 4 meses en los que se monitoreo y realizó análisis de parámetros como: una caracterización física de los suelos con granulometría (se obtuvo que el suelo era arenoso limoso); contenido de humedad (para asegurar una humedad del orden del 40 %), pH (cuyos valores estuvieron entre 6 y 8, los recomendados), conductividad eléctrica (su valor no supero el valor norma), contenido de TPH's en suelos (se redujo de 14 466 mg/kg hasta el valor más bajo de la muestra 9 de 801 mg/kg, con un rendimiento de degradación del 94,28 %, que contenía 10 % de cascarilla de arroz y 4 % de abono), y de esta manera se cumplió con la normativa vigente, incluso para este tipo de suelo.

Siendo el principal objetivo de la biorremediación, también se analizó TPH's en lixiviados (los cuales presentaron valores sobre 20 mg/L y fueron enviados a un gestor); nitrógeno, fósforo, potasio para establecer la relación de nutrientes recomendada pero no se logró determinar esta relación porque los resultados no arrojaron valores para establecer un comportamiento en la dosificación del abono orgánico.

En conclusión, del proyecto se logró una reducción en la concentración inicial del suelo contaminado con hidrocarburos mediante la degradación por parte de los microorganismos propios del suelo, suministrándole cascarilla de arroz que sirvió de sustrato y abono orgánico como aporte de nutrientes.

**Palabras Clave:** Biorremediación, Bioestimulación, *Landfarming*, Hidrocarburos totales de petróleo, Valores máximos permisibles.

## ABSTRACT

In the present curricular research work, the bioremediation of soil contaminated with hydrocarbons was carried out from a 300 kg pile, 54 kg were used separated into two rows A and B, being dosed with 6 kg of soil in each one and resulting in a total of 9 samples per row, varying from rice husks and organic fertilizer, the rest, 246 kg, consisted of rocky material (81.3%) and stones (18.7%) from oil spills, which was discarded from the project, the soils were Stored at Hazwat company.

The bioremediation was carried out in the facilities of the National Polytechnic School, in the Hydraulics building 10, where a greenhouse was built to be able to adjust the environmental conditions, with a relative humidity that ranged between 60% and 80% and a temperature between 20 and 40°C.

The bioremediation process lasted 4 months, in which parameters were monitored and analyzed, such as: a physical characterization of the soils with granulometry (it was found that the soil was sandy-silty); moisture content (to ensure a humidity of the order of 40%), pH (whose values were between 6 and 8, those recommended), electrical conductivity (its value did not exceed the standard value), content of TPH's in soils (it is reduced from 14 466 mg/kg to the lowest value of sample 9 of 800 mg/kg, which contained 10% rice husk and 4% fertilizer), and thus complied with current regulations, even for this type of soil.

Being the main objective of bioremediation, TPH's were also analyzed in leachates (which presented values above 20 mg/L and were sent to a manager); nitrogen, phosphorus, potassium to establish the recommended nutrient relationship but it was not possible to determine this relationship because the results did not show values to establish a behavior in the dosage of organic fertilizer.

In conclusion, the project achieved a reduction in the initial concentration of soil contaminated with hydrocarbons through degradation by soil microorganisms, supplying rice husks that served as a substrate and organic fertilizer as a nutrient supply.

**KEYWORDS:** Bioremediation, Biostimulation, *Landfarming*, Total petroleum hydrocarbons, Maximum permissible values.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE

La generación de desechos peligrosos provocados por el creciente sector industrial, como el farmacéutico, el alimenticio, el petrolero, el ganadero, entre otros, ha ocasionado que se requiera la gestión de dichos desechos en empresas como Hazwat, cuyo propósito es realizar de manera eficiente, el almacenamiento y disposición final de los desechos tóxicos y peligrosos, para evitar problemas ambientales y especialmente a la salud de los seres humanos (Hazwat, 2022).

Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (2015) la definición de residuo peligroso es “todo aquel desecho, en cualquier estado físico que, por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, explosivas, inflamables, biológicas, infecciosas o irritantes, representan un peligro para la salud humana, el equilibrio ecológico o al ambiente”. Para evitar este tipo de desechos se desarrolla e implementa este proyecto, cuyo propósito es establecer una metodología para la biorremediación de lodos contaminados con hidrocarburos que se encuentran en Hazwat.

La utilización de procesos de biorremediación como es el *Landfarming* para la gestión de lodos contaminados con hidrocarburos presenta como ventajas: la poca y casi nula invasividad sobre el medio ambiente, no se generan desechos peligrosos, como subproductos, además de un gasto mínimo de energía y su bajo costo en comparación con otras técnicas (Bordino, 2021).

En el presente proyecto se efectuará la biorremediación de lodos contaminados con petróleo, con el fin de reducir la concentración de sus componentes e intentar su disposición final como suelo de uso industrial, y de tal modo, diseñar una metodología eficiente que se pueda implementar en la empresa.

Según la información proporcionada por la empresa Hazwat en su calidad de gestor ambiental de desechos tóxicos y peligrosos, cuenta con una cantidad de 53 toneladas de desechos peligrosos almacenadas y como promedio mensual de lodos que ingresan 9,9 toneladas de desechos contaminados.

Todos los desechos tóxicos y peligrosos se encuentran almacenadas en IBC's o Drums dentro de áreas cubiertas procedentes de: plantas de tratamiento de aguas residuales, almacenamiento de combustibles, almacenamiento de hidrocarburos, desechos sólidos o lodos/sedimentos de sistemas de tratamiento de las aguas residuales industriales que contengan materiales peligrosos: Cr (VI), As, Cd, Se, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, cianuros, fenoles o metales pesados, derrames de hidrocarburos, actividades mineras, actividades petroleras, de todos estos lodos contaminados, se tomarán muestras para realizar un análisis de TPH's inicial, con los resultados obtenidos, se procederá a trabajar con los lodos que posean la concentración más altas (Hazwat, 2022).

### **1.1. Objetivo general**

- Tratar suelos contaminados con hidrocarburos *ex situ*, utilizando la Bioestimulación y *Landfarming* como métodos de Biorremediación para su disposición final como suelo de uso industrial (TULSMA, 2015) en la empresa Hazwat.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Instalar biopilas piloto para el proceso de Biorremediación mediante Landfarming considerando la cantidad de materiales: la masa total de suelo contaminado, sustrato y fertilizante.
- Caracterizar los lodos contaminados con hidrocarburos con un análisis inicial y final de parámetros específicos basados en las normas del TEXTO UNIFICADO

DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE Anexo 2  
Tabla 3 “Criterios de Remediación o Restauración” para suelos de uso industrial.

- Controlar los parámetros operativos en el proceso de *Landfarming*: temperatura ambiente y la humedad relativa en el invernadero; contenido de humedad y oxigenación del suelo contaminado.
- Desarrollar el proceso general de biorremediación para su utilización en la empresa Hazwat.

### 1.3. Alcance

En el presente proyecto de integración curricular se realizó el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos provenientes de derrames de petróleo, almacenados en la empresa HAZWAT, ubicada en el kilómetro 37 ½ en la vía Quito-Cayambe. Se utilizaron métodos de: Bioestimulación y *Landfarming*, la Biorremediación fue desarrollada ex situ, transportando los suelos, una cantidad de 300 kg, desde la empresa Hazwat hasta las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional para facilidad del control del proceso de biorremediación.

Antes de iniciar con la biorremediación, se realizó el análisis de hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) inicial de los suelos, en el Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM) para conocer la concentración del contaminante, de esta manera, al dar por concluido el proyecto se podrá conocer el grado de la descontaminación y la eficiencia del método, al tener de referencia el valor de Criterios de Restauración de Suelos (< 4000 mg/kg para uso industrial).

Conociendo la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) inicial en los suelos, se eligió la muestra con la concentración más alta para que durante el proceso que tuvo una duración de cuatro meses, se pudiera apreciar si existió una degradación

en el contaminante. Luego, se procedió a instalar los recipientes con la cantidad de cinco kilos de suelos en cada uno, obteniendo así dieciocho muestras. A las dieciocho muestras, se les adicionó un porcentaje variable de cascarilla de arroz y estiércol de vaca y de caballo, de esta manera se aportó de un sustrato y nutrientes que fueron utilizados por los microorganismos de las muestras de suelo.

Para la caracterización física, química de los suelos contaminados con hidrocarburos se midieron parámetros como: humedad, conductividad eléctrica, hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en suelos y lixiviados, nitrógeno, potasio y fósforo basados en la Norma del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Anexo 2 Tabla 3 "Criterios de Remediación o Restauración" para suelos de uso industrial, adicional a eso la caracterización física por granulometría basado en el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS) y para los ensayos microbiológicos se hizo uso de Normativa Internacional más específicamente de la Norma Oficial Mexicana para métodos de prueba microbiológica (Acuerdo Ministerial 097-A, 2015), al final estos suelos fueron dispuestos en las instalaciones de la empresa Hazwat para uso industrial.

Los tiempos estimados para los monitoreos de parámetros y la determinación de los mismos, quedaron definidos considerando el plazo máximo que se tenía para realizar el proyecto, ajustando estos a los periodos mínimos para poder obtener resultados apreciables, de la siguiente manera el control de la humedad relativa y de la temperatura ambiente, se registró diariamente, los ensayos de contenido de humedad y conductividad eléctrica para suelos se realizaron semanalmente. Los ensayos: granulométricos, de hidrocarburos totales de petróleo en suelos y lixiviados, nitrógeno, potasio y fósforo, además de la identificación de microorganismos, se llevó a cabo dos meses después de haber iniciado la biorremediación. En el cuarto mes de la biorremediación se realizó el ensayo de hidrocarburos totales de petróleo en suelos y se verificó que los resultados fueron menores al valor máximo permisible ( $<4000$  mg/kg) y se dio por concluido el proyecto de biorremediación.

#### 1.4. Marco Teórico

La industria petrolera se dedica a la exploración, extracción y comercialización del petróleo o también conocido como crudo, según el autor Agreda (2013) la teoría más aceptada sobre el origen de este compuesto, es que a partir de grandes cantidades de material orgánico dispuesto en el fondo de mares, lechos de ríos y lagos, con el transcurso de millones de años se cubrieron de sedimentos, eso, más la ausencia de oxígeno, altas condiciones de presión y temperatura, dando como resultado la descomposición de la materia orgánica en hidrocarburos, formándose así lo que hoy en día se conoce como petróleo crudo. A continuación, se resumen las actividades petroleras en el Ecuador.

Las actividades de exploración petrolera en el Ecuador iniciaron a finales del siglo XIX, la compañía Anglo Ecuadorian Oil Fields hizo el descubrimiento en la península de Santa Elena en 1911, los trabajos de explotación iniciaron oficialmente en 1924, desde 1925 lograron producir 1226 barriles diarios de crudo hasta su posterior decrecimiento, después de éste suceso la explotación petrolera se trasladó al nororiente de la región del Amazonas, en 1972 y por una década Ecuador se ubicó como el segundo productor latinoamericano de crudo gracias al Consorcio Texaco Gulf (Agreda, 2013). En un vistazo rápido, las actividades petroleras adquieren económicamente una importancia increíble, se pone en marcha la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana (CEPE), el país entra a la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) pero 19 años más tarde el expresidente Sixto Durán Ballén anunció el retiro del país de la organización, la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana adquiere la totalidad del Consorcio Texaco que en el año 1989 se transforma en PetroEcuador (Agreda, 2013).

Para el año 2004 Petroecuador, dominaba alrededor del 37 % de la producción de petróleo y en la actualidad continúan sus actividades productivas. Las actividades petroleras en el Ecuador también cuentan con la participación de empresas extranjeras como, por ejemplo: Canadá Grande, Vintage, Occidental, Keer Mcgee por mencionar algunas (Estupiñán, 2005). Hoy en día se sigue explotando petróleo en el país y es

importante resaltar que la generación de contaminantes se ha venido suscitando de manera paralela a las diversas actividades que han venido desarrollando dichas organizaciones y es necesario gestionar todos los desechos tóxicos y peligros que se van generando con el tratamiento del mismo.

#### **1.4.1. Generación de desechos peligroso por la industria petrolera**

La industria petrolera ha impulsado el nivel productivo de la sociedad, pero también ha provocado el desequilibrio y contaminación en ecosistemas, desastres ambientales por los derrames del petróleo (Mayorga & Reyes, 2022). El suelo es un recurso, que se ve afectado por los derrames de crudo, de acuerdo con Mayorga y Reyes (2022) está en riesgo: flora, fauna, microorganismos, fertilidad del suelo, así como también los animales y las personas, siendo estas últimas impactadas en ámbitos como son la salud, sistemas de producción y estilo de vida.

En Ecuador, son habituales los derrames de hidrocarburos al suelo y se han dado a conocer daños considerables al ambiente, ocurren principalmente en zonas amazónicas porque desde la construcción de los oleoductos e inicios de operación en el 2003 (Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) y Oleoducto de Crudos Pesados (OCP)) han sufrido ataques de saqueo y destrucción del sistema de transporte. La renovación de estos ecosistemas requiere cada vez más la utilización de métodos de remediación amigables con el medioambiente (Pesántez & Castro, 2016).

De acuerdo a Lara (2016), se puede observar en la Tabla 1 que la mayor proporción de derrames de petróleo se dan en la región amazónica, específicamente en el cantón Gonzalo Pizarro con un total de 145 234 barriles de petróleo entre 1967 y 2010, a causa de la actividad petrolera en el Ecuador.

**Tabla 1.** Derrames de petróleo en el Ecuador.

Cantón	Derrames Periodos (barriles de petróleo) 1967-1989	Derrames Periodos (barriles de petróleo) 1990-2001	Derrames Periodos (barriles de petróleo) 2002-2010	Derrames totales (barriles de petróleo)	Eventos Derrames
Gonzalo Pizarro	130 290	3 910	11 029	145 234	12
La Joya de los Sachas	4 013	66 121	15 871	86 005	238
Orellana	276	3 607	30 266	34 149	208
Lago Agrio	4 377	12 970	12 623	30 028	219
Santo Domingo		10 000		23 500	3
Quijos		9 180		17 280	9
Esmeraldas		15 084	12	12 096	6
El Chaco			11 070	11 070	3
Quinindé		4 000	7 008	11 008	6
Cascales	2 749	2 916	1 835	7 500	15
Shushufindi	983	2 247	2 025	5 255	133
Quito			3 517	3 517	4
Aguarico			2 500	2 500	2
Putumayo		1 230	977	2 207	40
Cuyabeno		11	490	1 536	4
La libertad			201	201	15
Total	142 688	131 276	99 424	395 986	917

**Fuente:** Lara (2016)

En el año 2004 se calculó el volumen de derrames “siendo 1,5 millones de toneladas por año, afectando suelo, agua y atmósfera. Donde el 70% de la contaminación total, causada por el impacto de la industria petrolera, está afectando el suelo” (Jara, 2018).

Uno de los derrames más graves ocurrió en el río Coca, donde se derramaron al menos 6.300 barriles de petróleo por la ruptura de un oleoducto de crudos pesados (OCP). Malestar para unas 27.000 personas y unas 105 comunidades Kichwas (Alvarado, 2022).



**Figura 1.** Afectación por el derrame en el Río Coca

*Fuente:* Ayala (2022)

Según Ayala (2022) se observa en la Figura 1, la longitud del daño causado por la erosión del suelo, lo que a su vez ha provocado un derrame de petróleo en la zona causando escasez de agua en la ciudad Coca.

El derrame más actual hasta la fecha se dio en la provincia de Esmeraldas donde la empresa Petroecuador confirmó el vertimiento de 1 200 barriles de petróleo en la costa norte del Ecuador (Armendáriz, 2023). Todos estos eventos ayudan a comprender el impacto que las actividades petroleras han generado en el medio ambiente, fraguando desechos tóxicos y peligrosos, que deben ser remediados.

### **1.4.2. Gestión de los desechos peligrosos con hidrocarburos**

En los últimos años los conflictos socioambientales que se han presentado en el Ecuador a causa de los derrames de petróleo, han originado que surja el debate sobre la contaminación ambiental, incidiendo en la gestión pública, es así que, en la Constitución de 1998 y 2008, se introdujeron aspectos relacionados con el medio ambiente y la declaración de la restauración ambiental, como derecho respectivo de la naturaleza (Lara, 2016).

Según la Constitución del Ecuador (2008) “el Art. 72.- La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración, será independiente de la obligación que tiene el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados. En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración y, adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas”.

El Ministerio del Ambiente ahora conocido como Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, en el cumplimiento de la disposición, creó el Programa de Recuperación Ambiental y Social (PRAS) de tal manera que se cumpla con la restauración de contaminación de la naturaleza (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2008).

Por tanto, surge la Biorremediación, que es una rama de la biotecnología para contribuir en la gestión de la contaminación y lograr la restauración de la naturaleza. Según los autores Cuvi y Bejarano (2015) existen hidrocarburos mayormente biodegradables en condiciones aeróbicas, siendo convertidos por microorganismos en biomasa, dióxido de carbono y agua, con el requerimiento indispensable de oxígeno y enzimas. Lo mismo, puede ocurrir en medios anaeróbicos, con la desventaja que el proceso lleva más tiempo.

En el Ecuador, específicamente en la región amazónica, desde 1990 se aplica la Biorremediación para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, producto del auge de contaminación. La cual era casusa de demandas legales y denuncias públicas a nivel nacional e internacional, hasta los derrames en la actualidad (Cuvi y Bejarano, 2015), pero los procesos de Biorremediación eran llevados a cabo por las mismas empresas causantes de los derrames, por lo que no subsanaban como tal la afectación. Hoy en día, existen gestores ambientales, como Hazwat, quien optimiza los procesos de Biorremediación.



**Figura 2.** Contaminación provocada por los pozos y estaciones de producción petrolera de la empresa Texaco en la región nororiental del Ecuador.

**Fuente:** Parrini (2013)

En la Figura 2, se puede observar el resultado de la actividad petrolera, contaminando así, ecosistemas enteros. Lo correcto para estas afectaciones, sería que el crudo mezclado con suelo sea recolectado en volquetas con ayuda de palas mecánicas y transportado a explanadas para ser sometido a procedimientos de Biorremediación (Cuvi

y Bejarano, 2015), estando presente dentro de esos procedimientos la Bioestimulación y el *Landfarming*.

### **1.4.3. Bioestimulación de suelos contaminados con hidrocarburos**

La Bioestimulación es una técnica de Biorremediación que consiste en estimular el crecimiento de los microorganismos autóctonos, capaces de degradar a los compuestos químicos tóxicos, agregando nutrientes (N, P, K), oxígeno, entre otros compuestos (Mendo, 2014). Esta técnica utiliza la biomasa y sus componentes como ciertas enzimas para biodegradar contaminantes orgánicos como son los hidrocarburos (Argumedo et al, 2009).

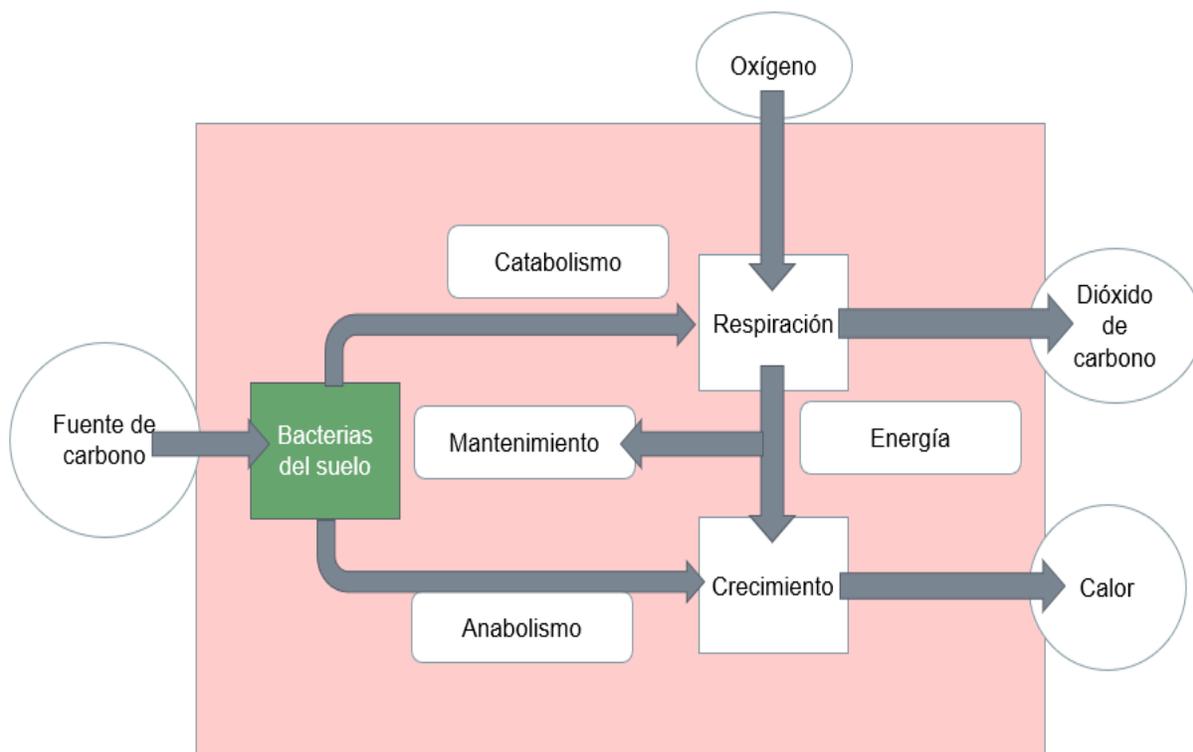
La Bioestimulación, adiciona de manera balanceada los nutrientes, según el autor Bedoya (2004) con una relación de carbono, nitrógeno y fósforo para los procesos de Biorremediación en un rango de 10:1:0,5 además optimiza otros factores limitantes como el contenido de oxígeno, el pH y el control de temperatura (Arboleda & Bravo, 2010).

Fuentes nutricionales: los nutrientes que tiene el suelo, son indispensables para el aumento de biomasa en el suelo, esto garantiza el crecimiento microbiano en el método de Bioestimulación, por lo que se adicionó el abono orgánico (se explica en la sección 1.4.4) del *Landfarming* y la cascarilla de arroz que es rica en sílice, porque tiene propiedades adsorbentes y de unir contaminantes, eliminándolos del medio ambiente (Rodríguez, 2010).

Además, la cascarilla de arroz, cascarilla de café se pueden utilizar como sustratos microbianos para el tratamiento biológico de contaminantes en el suelo (Corredor & Pérez, 2018). Los microorganismos tienen la capacidad metabólica de adaptarse a condiciones excesivas, utilizan procesos bioquímicos para degradar los contaminantes que los rodean (Rodríguez, 2013), por ejemplo, el metabolismo que hace referencia a

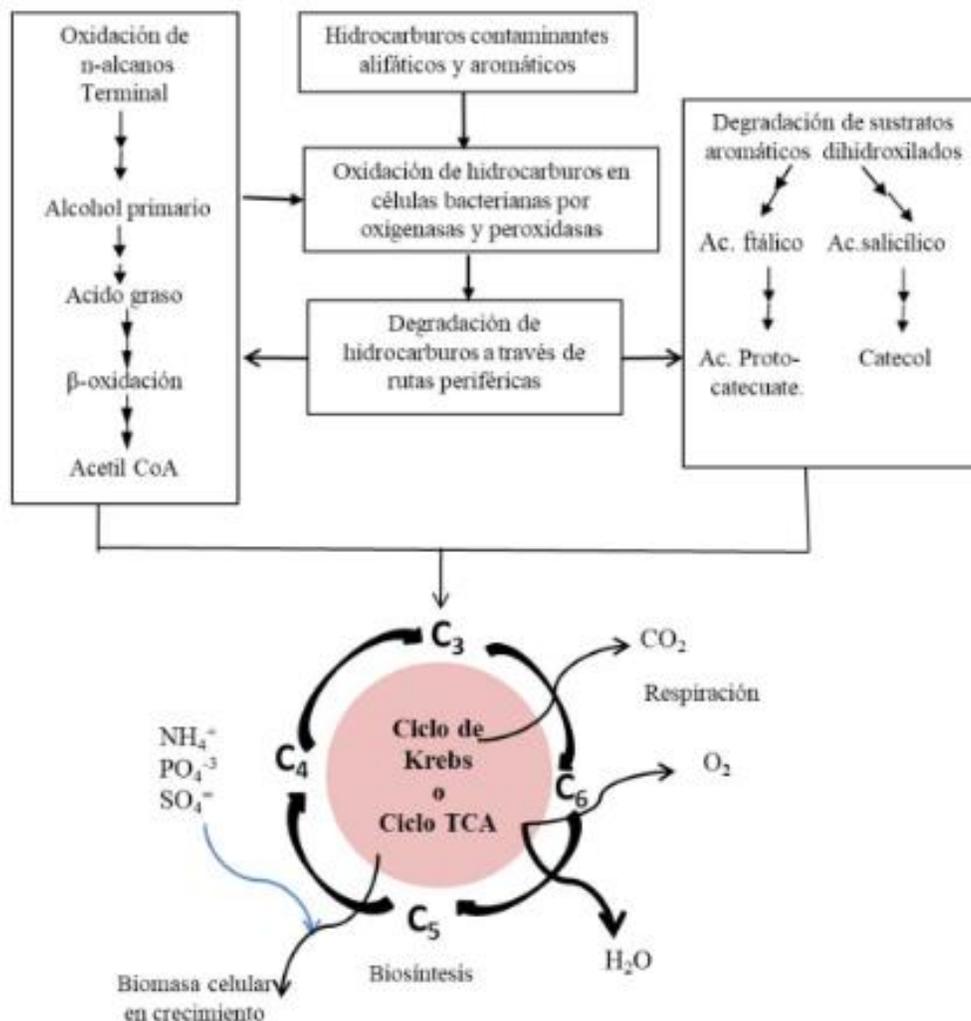
reacciones para obtener energía química del entorno y degradar moléculas en funciones celulares (Vanbergen & Wintle, 2019).

Según Maguiña (2011) los procesos metabólicos se dividen en anabólicos y catabólicos, como se puede observar en la Figura 3, el contaminante (hidrocarburo) es una fuente rica de carbono, con esta fuente de carbono el microorganismo realiza dos rutas metabólicas opuestas (Apella & Araujo, 2005), por un lado el anabolismo donde el microorganismo es capaz de sintetizar moléculas complejas a partir de moléculas simples, utilizando energía, aumento de su biomasa y producción de calor (Voet & Voet 2006), mientras que el catabolismo degrada estas moléculas para transformarlas principalmente en dióxido de carbono y agua por rutas aeróbicas (por la utilización de oxígeno) (Cabrera, 2015).



**Figura 3.** Biorremediación como tratamiento para suelos

Es importante mencionar sobre la participación de la energía, por un lado, el catabolismo libera energía, por la degradación de moléculas complejas en moléculas más simples, que puede ser utilizada en diversas funciones. Esta energía es requerida por el anabolismo, para sintetizar moléculas complejas (Varela & Grotiuz, 2008).



**Figura 4.** Rutas metabólicas para biodegradar compuestos xenobióticos

**Fuente:** Rodríguez et al. (2022)

De acuerdo con la Figura 4 presentada por los autores Rodríguez *et al.* (2022) se observan las rutas metabólicas para la degradación de hidrocarburos, como son la respiración celular, la oxidación por enzimas y rutas periféricas como la oxidación beta (Vizuet, 2011), donde para lograrlo, primero se toma en cuenta que los hidrocarburos

se clasifican en alifáticos y aromáticos, para oxidar esta variedad de hidrocarburos, la célula recurre a la utilización de enzimas como la oxigenasa y la peroxidasa (Zárate, 2023).

La peroxidasa y la oxigenasa son enzimas que oxidan sustratos mediante la transferencia de electrones, mientras que la oxigenasa utiliza oxígeno, la peroxidasa utiliza peróxido de hidrógeno (Sánchez, 2010), los microorganismos además de enzimas utilizan rutas periféricas para oxidar los contaminantes, como por ejemplo, para la degradación de los alcanos se utiliza la beta oxidación Romero (2014), con la cual, a partir de la deshidrogenación del ácido graso proveniente del hidrocarburo, se libera Acetil Coenzima A, una vez obtenida esta molécula intermedia se puede entrar al Ciclo de Krebs o respiración celular, donde esta molécula se oxida completamente hasta generar dióxido de carbono y producción de energía (Mora, 2016).

Para los hidrocarburos aromáticos y los dihidroxilados tienen dos rutas metabólicas para degradarlos, por un lado, los hidrocarburos aromáticos como el benceno, tolueno y xileno pasan a ser transformados en ácido ftálico (García-Martínez, 2005), y este a su vez en el ácido protocatecuato, cuyo resultado es una molécula de propiedad antioxidante y antiinflamatoria (Campos, 2011), por su parte, los hidrocarburos dihidroxilados (hidrocarburos con 2 grupos hidroxilo) (García, & Borrajo, 2005), se transforman en ácido salicílico, y este es transformado en catecol por la enzima salicilato hidroxilasa, el catecol es una molécula que se utiliza en síntesis de otros compuestos químicos (Lubbers, et al, 2021).

También emplean procesos como la mineralización, en la que la contaminación se convierte en productos inocuos, además, pueden cambiar químicamente al contaminante (Manahan, 2006). Junto a procesos de oxidación-reducción, fermentación y bioacumulación para descomponer los contaminantes, dependiendo del microorganismo (Cabrera, 2015).

Algunos de los géneros bacterianos más estudiados para biorremediación son *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Serratia* y *Proteus*, debido a que se ha demostrado que pueden degradar hasta 100 tipos de fuentes de carbono (Chikere et al., 2012).

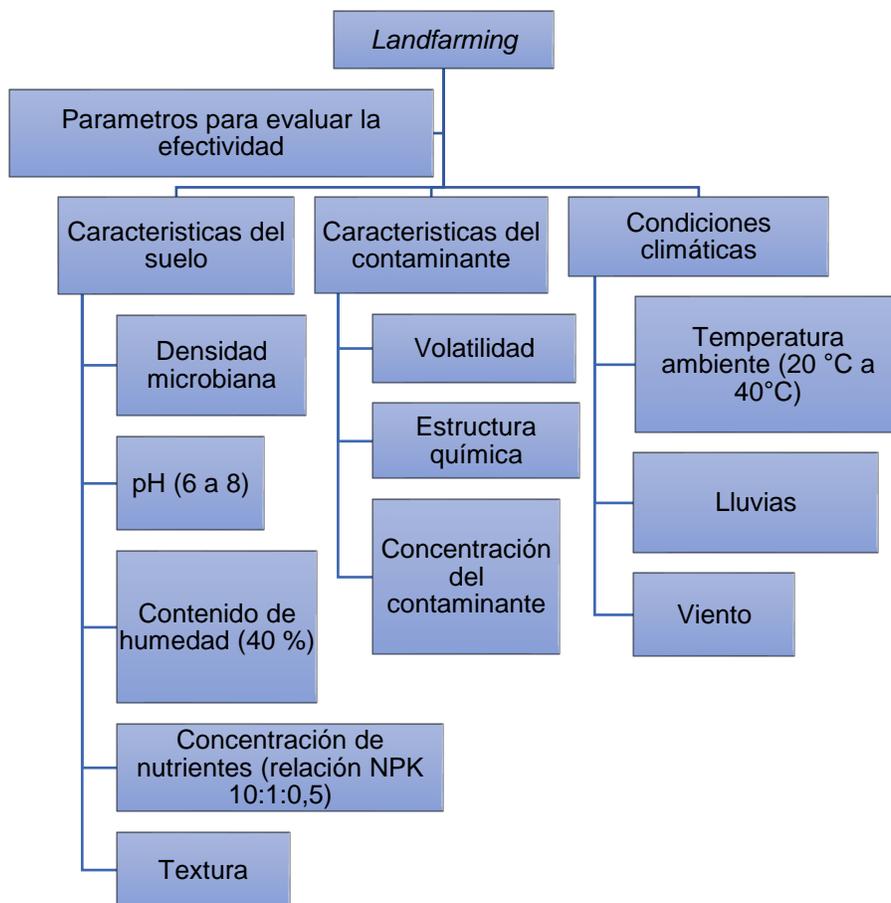
#### **1.4.4. Landfarming de suelos contaminados con hidrocarburos**

El *Landfarming*, según el autor Bedoya (2004) es una tecnología de Biorremediación de suelos a gran escala que puede ser aplicada sobre zonas específicas o en celdas de tratamientos biológicos, el material a tratar puede ser: suelos, sedimentos o lodos contaminados con petróleo, posteriormente son removidos periódicamente o en el mejor de los casos si se cuenta con el material adecuado, arados, permitiendo la aireación de los suelos. También el autor menciona que, las condiciones del material y ciertos parámetros en tratamiento deben ser controladas para utilizar un índice de degradación del contaminante, así se sabrá si esta técnica ha sido aplicada satisfactoriamente, estas condiciones y parámetros son detallados a continuación.

En la Figura 5 se presentan las variables operacionales a ser monitoreadas: tipo y concentración del contaminante, concentración de microorganismos, concentración de nutrientes (relación de NPK recomendada 10:1:0,5), aireación y condiciones ambientales (temperatura ambiente de 20 °C a 40 °C y humedad relativa de 70 %) (Castillo, 2017), las cuales resultan críticas para la obtención de resultados exitosos. A continuación, se hace una descripción de la importancia de cada una de ellas.

Sobre el tipo de hidrocarburo, Castillo (2017) asevera que un compuesto alifático de cadena lineal es de fácil degradación, pero cuando ya existen sustituyentes alcanos de cadena larga, la situación cambia; al igual que con los compuestos alifáticos insaturados, su degradación es lenta o en el peor de los casos inalcanzable. Respecto a la concentración del contaminante, además propone que hasta concentraciones del 30 % se aprecia una degradación satisfactoria, por encima en muy baja o incluso nula, todo

ocurre porque la concentración del contaminante puede llegar a causar la inhibición del desarrollo microbiano.



**Figura 5.** Parámetros para evaluar la efectividad de la técnica de *Landfarming*.

Todos los suelos expuestos a derrames de petróleo contienen en su medio, microorganismos degradadores de hidrocarburos, resultando más rentable la adaptación del suelo con ayuda de condiciones ambientales, que la importación de microorganismos externos o ajenos al medio, asegurando también el equilibrio en los ecosistemas (Castillo, 2017).

Los nutrientes son sustancias químicas que los microorganismos usan para su desarrollo, estas son (N, P, K)

Nitrógeno, lo obtienen de la incorporación del fertilizante (estiércol) para la producción de aminoácidos y enzimas. El fósforo también lo encuentran en el estiércol y lo usan para la formación de compuestos energéticos dentro de la célula que son utilizados en reproducción y degradación, además, fuentes de carbono, proporcionadas por el petróleo, con esta fuente los microorganismos producen compuestos celulares y productos metabólicos (dióxido de carbono, agua y enzimas) y masa celular (Castillo, 2017).

Las condiciones óptimas como el pH es entre 6 y 8 y es recomendable adicionar azufre o carbonato de calcio en caso de ser necesario la reducción o el incremento del pH respectivamente; la humedad relativa y el contenido de humedad del orden del 70 % y 40 %, respectivamente, porque el agua resulta de suma importancia para el desarrollo de los microorganismos actuando como medio de transporte de oxígeno y de los nutrientes (N, P, K), en el caso de presentar un exceso de humedad se puede producir en el desarrollo de los microorganismos, adicional la temperatura entre 20°C y 40°C es crítica en el aumento de la velocidad de degradación del contaminante pero no se debe exceder los 40°C porque ocurre una disminución en las actividades microbianas (Castillo, 2017) .

## **2. METODOLOGÍA**

La Biorremediación se inició con un muestreo en las instalaciones de la empresa Hazwat, específicamente en las piscinas donde se encontraban almacenados los suelos contaminados con hidrocarburos, seguido de la construcción de un invernadero para el *Landfarming* en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Posteriormente se realizó un estudio y descripción de los materiales utilizados en la Bioestimulación, se incorporó los materiales y se monitoreó las condiciones ambientales en el desarrollo del método.



**Figura 6.** Ubicación de la empresa Hazwat

Fuente. Google Maps (2023)

## 2.1. Muestreo en la empresa Hazwat

El muestreo se realizó en la empresa Hazwat ubicada en el “kilómetro 8 vía Lago Agrio, El Coca” debido a que existían varias pilas con suelos contaminados de diferentes y desconocidas concentraciones como se puede observar en la Figura 7, y se escogió la pila que mejor se adaptó al proceso, aquella cuya concentración de TPH fue la mayor y de esta manera, por la biorremediación se pudo llegar al valor norma de hidrocarburos totales de petróleo para suelo de uso industrial (<4000 mg/kg de TPH’s), haciendo uso de Bioestimulación y *Landfarming*, en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional, sirviéndose de un área adecuada para el proyecto. El muestreo se llevó a cabo por una sola vez el 15 de noviembre del 2022, tomándose 5 muestras de 1 kg por cada muestra, aproximadamente.

### Toma de muestra en la Piscina



**Figura 7.** Pilas de suelos contaminados con petróleo

Para el muestreo se procedió con una subdivisión en 5 puntos del área total de la piscina y la toma de la muestra fue llevada a cabo con las herramientas adecuadas asegurando la representatividad de las muestras (guantes, mandil, equipos de protección personal, palas, barreno armable de perforación), del muestreo se obtuvieron 5 muestras. Durante el muestreo se tomaron las condiciones ambientales del lugar como se puede observar en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones ambientales en la toma de muestra.

<b>Condiciones ambientales de la toma de muestra</b>
Temperatura: 28 °C
Humedad relativa: 21%

Las condiciones ambientales presentadas en la Tabla 2 fueron tomadas durante el muestreo para comprobar si se encontraban en los rangos óptimos recomendados por Castillo (2017) para que los microorganismos autóctonos puedan adaptarse al medio.

## 2.2. Adecuación del sitio para el *Landfarming*

Se realizó la construcción de un invernadero, como se puede observar en la Figura 8 con el objetivo de simular las condiciones de temperatura ambiente (entre 20 °C y 40 °C) y humedad relativa (70 %) óptimas para poder llevar a cabo la biorremediación en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional, debido a que en el espacio autorizado como área de trabajo la temperatura oscilaba a los 16 °C. El invernadero fue construido con paredes y piso de madera y en el techo se colocó plástico grueso, con dimensiones iguales a 9 metros cuadrados de superficie y 2 metros de altura. Este fue construido el 17 de noviembre del 2022.



**Figura 8.** Construcción del invernadero



**Figura 9.** a. Preparación del área de trabajo; b. Las submuestras adicionadas con cascarilla de arroz y fertilizante

Una vez armado el invernadero se adquirió el resto de los materiales: estos incluyen recipientes plásticos para la separación de submuestras, mesas (facilitadas por la Escuela Politécnica Nacional), mangueras y recipientes para la recolección de lixiviados. Adicional, se utilizaron 2 calefactores para mantener las condiciones ambientales de temperatura y humedad adecuadas, como se observa en la Figura 9.a.

**Tabla 3.** Variables del método de biorremediación de suelos para la hilera A

Masa por recipiente (g)	Hilera	Código de identificación de cada muestra	Porcentaje de abono orgánico (%)	Abono orgánico (g)	Porcentaje de cascarilla de arroz (%)	Cascarilla de arroz (g)
6000	A	1	0,1	6	10	600
		2	0,5	30	10	600
		3	1,0	60	10	600
		4	1,5	90	10	600
		5	2	120	10	600
		6	2,5	150	10	600
		7	3,0	180	10	600
		8	3,5	210	10	600
		9	4,0	240	10	600

**Tabla 4.** Variables del método de biorremediación de suelos para la hilera B

Masa por recipiente (g)	Hilera	Código de identificación de cada muestra	Porcentaje de abono orgánico (%)	Abono orgánico (g)	Porcentaje de cascarilla de arroz (%)	Cascarilla de arroz (g)
6000	B	10	0,1	6	5	300
		11	0,5	30	5	300
		12	1,0	60	5	300
		13	1,5	90	5	300
		14	2,0	120	5	300
		15	2,5	150	5	300
		16	3,0	180	5	300
		17	3,5	210	5	300
		18	4,0	240	5	300

En la Tabla 3 y Tabla 4 se detalla las cantidades de suelo contaminado, cascarilla de arroz y fertilizante que se colocó en cada recipiente y como se puede observar en la Figura 9.b.

### 2.3. Análisis de los suelos contaminados con hidrocarburos

El proyecto de biorremediación, requirió la realización de ensayos a los suelos contaminados con hidrocarburos, antes de dar inicio, durante y al final para poder dar como concluido el proceso, con análisis de laboratorio y caracterización respectiva de suelos y lixiviados, se hizo uso de análisis físicos, químicos y microbiológicos, con parámetros seleccionados en base al Anexo 2 Tabla 3 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (Acuerdo Ministerial 097-A, 2015), Sistema Unificado de Clasificación de Suelos y la Norma Oficial Mexicana, como se especifica en la sección (1.3).

En la Tabla 5 se presentan los ensayos que se realizaron en: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA), Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) y el Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM), según

procedimientos normalizados (*Standard Methods for the Examination of Wastes and Wastewater*, ASTM, INEN y Normas Mexicanas). Se puede apreciar en el Anexo 1 los parámetros seleccionados para ser analizados en los laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional.

**Tabla 5.** Parámetros analizados para las muestras de suelos.

Indicadores		Parámetro
Generales		Conductividad eléctrica
		pH
		Humedad relativa
		Temperatura ambiente
Físicos		Tamaño de partícula
Químicos	Orgánicos	Hidrocarburos totales de petróleo en suelo
		Hidrocarburos totales de petróleo en lixiviados
		Fósforo total
		Nitrógeno total
	Inorgánicos	Potasio
Biológicos		Identificación de microorganismos

### 2.3.1. Identificación de microorganismos en suelos con hidrocarburos

Para conocer sobre la presencia de microorganismo en el suelo contaminado con hidrocarburos se realizó el ensayo de identificación microbiológica, las muestras fueron enviadas al laboratorio LDIA para la realización del ensayo, el análisis se basó en la Norma Oficial Mexicana (NOM-210SSA1) con la identificación microscópica de acuerdo a sus características morfológicas, a partir de un aislamiento y una tinción respectiva

para hongos (azul de metileno) y una tinción para bacterias la tinción Gram (NORMA Oficial Mexicana, 2014).

### **2.3.2. Conductividad eléctrica del suelo con hidrocarburos**

El análisis de conductividad eléctrica se realizó debido a la necesidad de dar seguimiento y verificar el cumplimiento según la normativa (TULSMA Anexo 2 Tabla 3 Criterios de Remediación o Restauración del Suelo) de acuerdo al Acuerdo Ministerial 097-A (2015) con el objetivo de estar dentro de los límites máximos permisibles con la metodología seleccionada del Standard Methods 2510 B (Electrométrico), este análisis de control se llevó a cabo con 3 muestras aleatorias semanalmente con una dilución 1:4 con agua destilada en el Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA), como control se realizó la verificación de la calibración antes de cada análisis con material de referencia de conductividad con dos repeticiones por medición de las dieciocho muestras (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

### **2.3.3. pH del suelo con hidrocarburos**

El análisis de pH se realizó debido a la necesidad de dar seguimiento y verificar el cumplimiento según la normativa (TULSMA Anexo 2 Tabla 3 Criterios de Remediación o Restauración del Suelo) con el objetivo de estar dentro de los límites máximos permisibles con la metodología seleccionada del Standard Methods 4500 - H+ B (Electrométrico) con una dilución 1:4 con agua destilada en el Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA), se realizó la calibración con los buffers de pH 4, 7 y 10 con dos repeticiones de las dieciocho muestras (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

### **2.3.4. Temperatura ambiente y humedad relativa del invernadero**

Las mediciones de la temperatura ambiente y humedad relativa se realizaron con el fin de llevar un registro de las condiciones meteorológicas del entorno, en el que se

desarrollaron los microorganismos, con el objetivo de replicar las condiciones óptimas para la biorremediación (temperatura entre 20 y 40 °C y humedad del 70 %) con la ayuda de un termohigrómetro diariamente.

### **2.3.5. Contenido de humedad del suelo con hidrocarburos**

El análisis se realizó debido a las condiciones de humedad para desarrollar la biorremediación que en promedio debe ser 40 %, con el objetivo de reconocer si se debe agregar mayor cantidad de agua en el riego que se realizaba diariamente junto con la remoción del suelo para un humedecimiento homogéneo, con la metodología basada en la norma INEN 863 (Gravimetría) con ayuda de una estufa a 105 °C y una balanza analítica en el Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA), se realizaron ensayos semanalmente de las 18 muestras (INEN 863, 2011).

### **2.3.6. Caracterización física de suelos con hidrocarburos**

Para la realización de la caracterización física de suelos con hidrocarburos las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR), un total de 18 muestras con el fin de determinar el tamaño de partícula y saber a qué tipo de suelo corresponde, se realizó contenido de humedad basado en la norma ASTM D2216; límite plástico basado en la norma ASTM D4318; límite líquido basado en la norma ASTM4318; granulometría basado en la norma ASTM6913. Este procedimiento caracteriza el suelo por métodos granulométricos y determina la capacidad del suelo para retención de humedad y su capacidad de trabajo (ASTM International, 2019).

### **2.3.7. Potasio en suelos con hidrocarburos**

El análisis de Potasio se realizó para conocer la cantidad del nutriente presente en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos con el objetivo de saber si

corresponde a la relación de nutrientes óptima para la biorremediación como se especifica en la sección (1.4.4). Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA), los ensayos se basaron en el Standard Methods 3500 - K (Espectrofotometría VIS), se analizaron dieciocho muestras con controles de sales de potasio (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

### **2.3.8. Fósforo total en suelos con hidrocarburos**

El análisis de Fósforo Total se realizó para conocer la cantidad del nutriente presente en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos con el objetivo de saber si corresponde a la relación de nutrientes óptima para la biorremediación como se especifica en la sección (1.4.4). Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA) para la realización de los ensayos de fósforo total se realiza una extracción por método de Olsen, y la detección por el método HACH 8190 SM Ed.23, 2017, 4500- P E (Espectrofotometría VIS), se analizaron dieciocho muestras con controles de sales de fósforo (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

### **2.3.9. Nitrógeno Total Kjeldahl en suelos con hidrocarburos**

El análisis de Nitrógeno Total Kjeldahl se realizó para conocer la cantidad de nitrógeno en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburos con el objetivo de saber si es posible establecer la relación de nutrientes óptima para la biorremediación como se especifica en la sección (1.4.4). Las muestras fueron enviadas al Laboratorio del Centro de Investigación y Control Ambiental (CICAM), los ensayos se basaron en el método HACH WATER ANALYSIS HANDBOOK, ED 7, 2012, 8075 (Volumetría), se analizaron 18 muestras con controles de blancos (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

### **2.3.10. Hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en el suelo tratado**

El análisis de hidrocarburos totales de petróleo en suelos fue realizado para conocer el grado de contaminación de las muestras de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006-Gravimetría (Secretaría de economía, 2006) en el Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA), se llevó a cabo un total de tres ensayos descritos a continuación: el primer ensayo con cinco muestras resultantes del muestreo en la empresa Hazwat como se indica en la sección (2.1) y se procedió a trabajar con muestra de mayor concentración ya que se adaptaba mejor para la biorremediación; el segundo ensayo fue dos meses después de haber iniciado la biorremediación, se analizó dieciocho muestras, esto con el fin de conocer la reducción en la presencia del contaminante en el suelo y un tercer ensayo a las mismas dieciocho muestras transcurridos dos meses desde el segundo ensayo para determinar si se puede dar como concluida la biorremediación cumpliendo así el límite máximo permisible para suelo de uso industrial (<4000 mg/kg TPH's)

### **2.3.11. Hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en lixiviados**

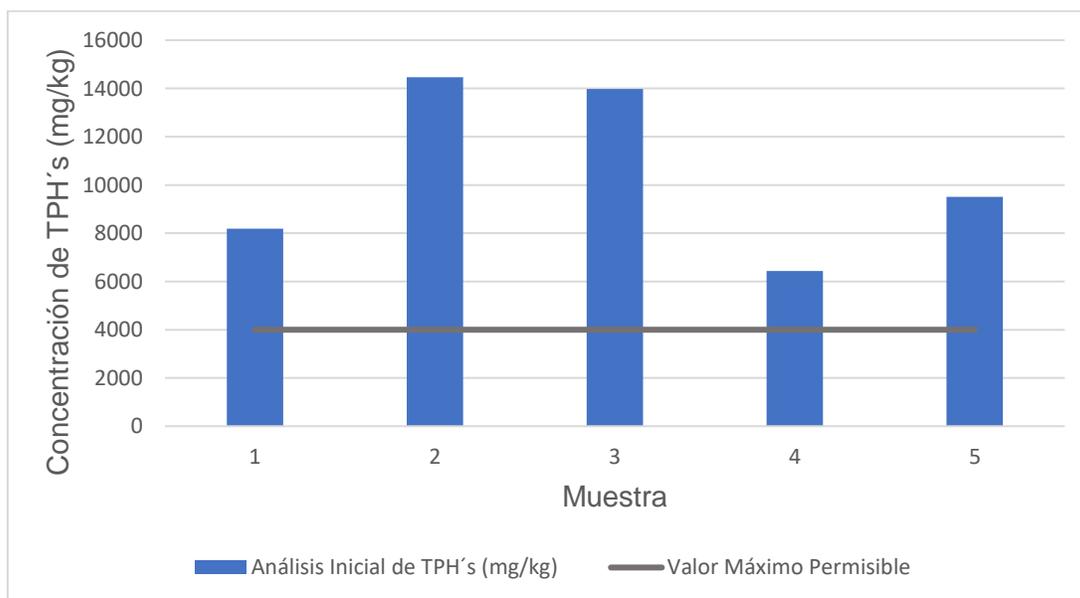
El análisis de hidrocarburos totales de petróleo se realizó debido a que producto del humedecimiento y remoción de las muestras en la biorremediación se produjo lixiviados, los cuales fueron almacenados en recipientes adecuados para ser analizadas sus concentraciones en TPH basados en el Standard Methods 5520 F (Gravimetría) en el Laboratorio de Docencia de Ingeniería Ambiental (LDIA), se analizaron dieciocho muestras, los ensayos se realizaron al finalizar el tercer análisis de TPH's es suelos (Baird, Eaton, & Rice, 2017).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Muestreo en la empresa Hazwat

En el mes de noviembre del 2022 se realizó el muestreo de la piscina donde estaban almacenados los suelos contaminados con hidrocarburos, en Hazwat, como resultados del muestreo se obtuvieron 5 muestras representativas para su posterior análisis de hidrocarburos totales de petróleo. Los resultados se presentan a continuación en el diagrama de barras de la Figura 10.

Una vez obtenidos los resultados de hidrocarburos de las 5 muestras, se optó por utilizar la muestra 2 porque es la que presentó mayor cantidad de contaminante, así, se pudo apreciar mejor la biodegradación, para eso se utilizó una cantidad inicial de 300 kg de suelos contaminados, el mismo que fue dividido en 2 hileras (A y B), estas a su vez, estuvieron conformadas por 9 muestras como se muestras en la sección 2.2 (Tabla 3 y 4).



**Figura 10.** Concentración de hidrocarburos totales de petróleo de las 5 muestras obtenidas en el muestreo en Hazwat

Para poder identificar las muestras de acuerdo a la variación de las cantidades de cascarilla de arroz y fertilizante se les asignó códigos del 1 al 18, esto se muestra en la Tabla 6.

Las 18 muestras fueron dosificadas de la manera que se muestra en la Tabla 6 porque se deseaba comprobar si eso provocaría una variación en los resultados del proceso de degradación del contaminante, es decir, si por tener mayor o menor cantidad de abono orgánico esto permitiría que el proceso de biorremediación sea más rápido y lo mismo con la cascarilla de arroz. Para corroborar esa hipótesis se realizaron varios ensayos que se detallan en la sección (3.2).

**Tabla 6.** Identificación y dosificación de las muestras para cada hilera

<b>Código de identificación de la muestra</b>	<b>Porcentajes de cascarilla de arroz añadido a cada muestra (%)</b>	<b>Porcentajes de abono orgánico añadido a cada muestra (%)</b>
1	10	0,1
2	10	0,5
3	10	1,0
4	10	1,5
5	10	2,0
6	10	2,5
7	10	3,0
8	10	3,5
9	10	4,0
10	5	0,1
11	5	0,5
12	5	1,0
13	5	1,5
14	5	2,0
15	5	2,5
16	5	3,0
17	5	3,5
18	5	4,0

## 3.2. Análisis de los suelos contaminados con hidrocarburos

Una vez iniciada la biorremediación de suelos contaminados con petróleo se vuelve imperativo en control, monitoreo y realización de análisis de los parámetros de la sección (2.3). En esta sección se hace énfasis en los principales hallazgos.

### 3.2.1. Identificación de microorganismos en suelos con hidrocarburos

Al ser un parámetro de gran importancia en el proyecto, debido a su participación en el proceso de biorremediación del suelo, se identificó de forma cualitativa la presencia de microorganismos en el suelo con hidrocarburos, con el objetivo saber si son aptos en la degradación del contaminante (Gupta, et al, 2017).

Como se observa en la Tabla 7, se identificó las bacterias presentes en el suelo contaminado como se describe en el apartado (2.3.11), las cuales son *Streptomyces* y *Micrococcus*, siendo estas gram positivas, y *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Chromobacterium*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Cytophaga*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Burkholderia*, *Aerobacter* y *Erwinia* siendo estas gram negativas.

De acuerdo con investigadores como Maier & Soberon, (2000) explica el gran potencial que tiene las bacterias del género *Pseudomonas*, ya que estas son nombradas en su mayoría en tesis similares, esta bacteria puede llegar a producir biosurfactantes, cuya característica principal es la de reducir la tensión superficial entre el agua y los hidrocarburos totales del petróleo (Obregón, 2022), demás las bacterias Gram negativas cuentan con una versatilidad y fácil adaptación a medios contaminados (Mair, et al, 2013). Las bacterias gram positivas encontradas (*Streptomyces* y *Micrococcus*) también cuentan con la capacidad de biodegradar hidrocarburos, utilizando el carbono presente en los hidrocarburos y generando energía (Brzeszcz, & Kaszycki, 2018).

Los géneros estudiados como: *Chromobacterium* por los autores Soler & Alcázar (2020), *Achromobacter* y *Agrobacterium* por Viñas (2005), *Cytophag* por Pucci (2009), *Alcaligenes* por Chirinos, et al, (2010) y *Burkholderia* por Cruz & Proaño (2010) debido a su capacidad de degradación de hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Por otro lado, de acuerdo con Réves, et al, (2020) el género *Flavobacterium* actúa en la degradación de hidrocarburos alifáticos entre ellos el diésel y el petróleo crudo.

**Tabla 7.** Resultados de la identificación de microorganismos

<b>Nombre de las bacterias</b>	<b>Gram</b>	<b>Forma</b>
<i>Streptomyces</i>	Positivo	Estreptobacilos
<i>Pseudomonas</i>	Negativa	Bacilos
<i>Xanthomonas</i>	Negativa	Bacilos
<i>Chromobacterium</i>	Negativa	Bacilos
<i>Flavobacterium</i>	Negativa	Estreptobacilos
<i>Achromobacter</i>	Negativa	Bacilos
<i>Cytophaga</i>	Negativa	Bacilos
<i>Agrobacterium</i>	Negativa	Bacilos
<i>Alcaligenes</i>	Negativa	Bacilos
<i>Burkholderia</i>	Negativa	Diplobacilos
<i>Micrococcus</i>	Positivas	Estafilococos
<i>Aerobacter</i>	Negativa	Estreptobacilos
<i>Erwinia.</i>	Negativa	Bacilos

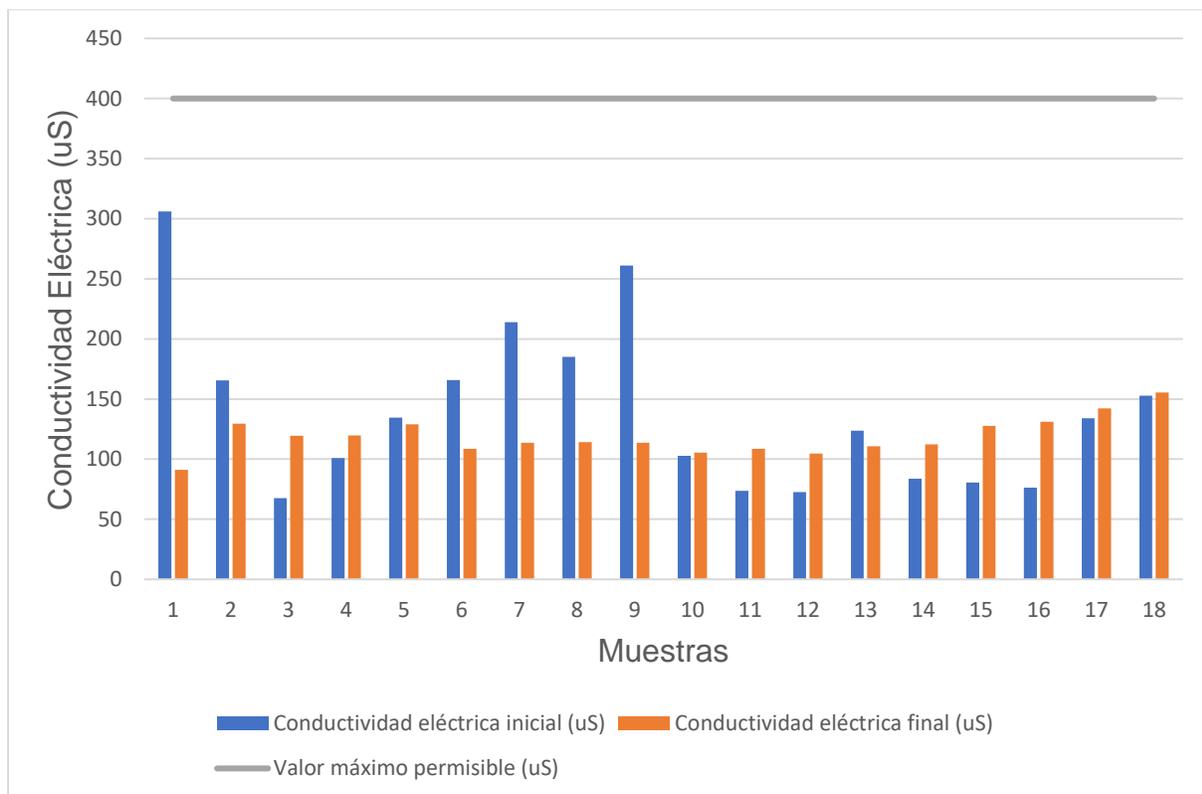
En la Tabla 7, se observan los resultados de la presencia de hongos en las muestras analizadas de la biorremediación, se tiene a los géneros de *Aspergillus*, *Penicillium*, *Phymatotrichopsis*, *Verticillium* y *Rhizopus*.

**Tabla 8.** Resultados de la identificación de microorganismos (hongos)

Nombre de los hongos
<i>Aspergillus</i>
<i>Penicillium</i>
<i>Phymatotrichopsis</i>
<i>Verticillium</i>
<i>Rhizopus</i>

La diversidad de hongos autóctona presente en el suelo con hidrocarburos, de acuerdo con los resultados obtenidos en la identificación de la Tabla 8, poseen capacidades inherentes de biodegradación, además de seguir siendo foco de estudio, por su capacidad única de supervivencia en condiciones de contaminación extrema.

### 3.2.2. Conductividad eléctrica del suelo con hidrocarburos



**Figura 11.** Resultados de la conductividad eléctrica en suelos contaminados con hidrocarburos.

En la Figura 11 se presenta la gráfica de la conductividad eléctrica de las 18 muestras utilizadas en el proceso de biorremediación y también se presenta el valor máximo permisible del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, que para los criterios de remediación de suelo para uso industrial es 400 (uS) pudiendo observar así que este parámetro de control se cumplió satisfactoriamente.

De acuerdo con la Figura 11, se observa el resultado de conductividad eléctrica medido en dos ocasiones, la primera al inicio de la biorremediación, con esos valores se pudo comprobar que este parámetro, pese a tener valores elevados por la presencia de los hidrocarburos no excedía el valor máximo permisible y la segunda medida al final de la biorremediación, con lo que se comprobó que existió un ligero aumento en los valores de la conductividad eléctrica, esto ocurrió debido a un factor externo como lo es el riego diario con agua cruda para mantener el contenido de humedad requerido que se explica en la sección (1.4.4).

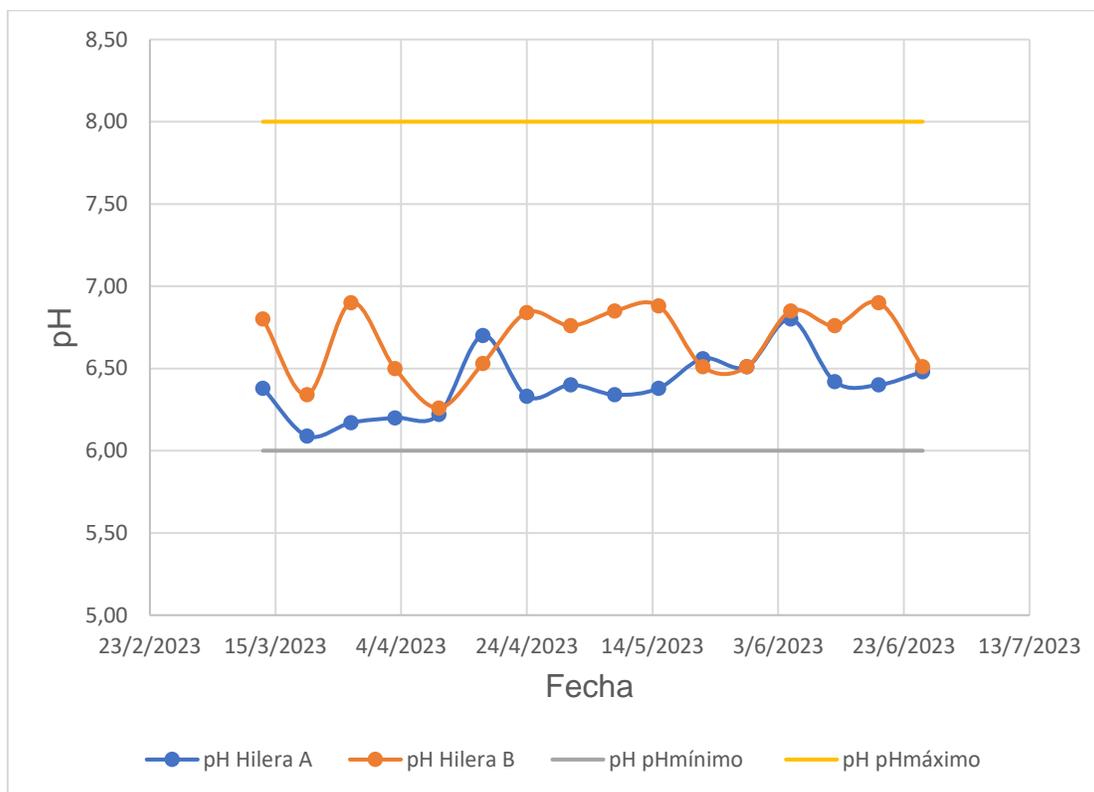
El agua fue analizada en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental y presentó niveles altos de conductividad eléctrica (alrededor de 300 (uS)), por tal motivo, se le atribuye el incremento en la conductividad del suelo contaminado con hidrocarburos que se aprecia en la Figura 11, no obstante, se mantuvieron bajo el criterio de la norma.

### **3.2.3. pH del suelo con hidrocarburos**

Los resultados del comportamiento promedio del pH para las dos hileras medidas se presentan en la Tabla AIII del Anexo 3, de estos datos de obtiene la Figura 12 se puede observar la tendencia que tuvo el pH del suelo contaminado con hidrocarburos al compararlos con los valores máximo y mínimo recomendados por Castillo (2017).

Se puede notar en la Figura 12 que tanto la hilera A como la hilera B, mantuvieron su respectivo pH dentro del intervalo recomendado entre 6 y 8, por autores como Cruz, et

al (2016), ya que si no están dentro de este rango afectan la diversidad microbiana, por tal motivo no fue necesario adicionar ninguna sustancia reguladora de pH en el suelo.



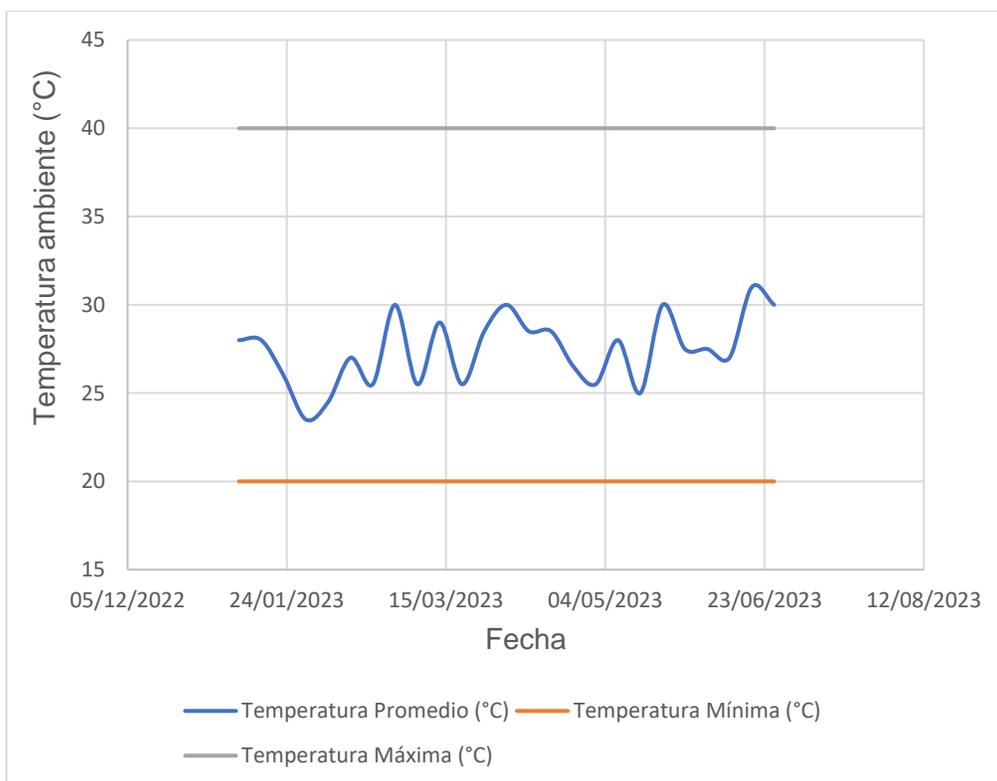
**Figura 12.** pH del suelo contaminado con hidrocarburos de las hileras A y B en función del tiempo comparadas con los valores máximos permisibles normados por el TULSMA (2015).

### 3.2.4. Temperatura ambiente y humedad relativa del invernadero

Las medidas de temperatura ambiente con un termohigrómetro resultaron fundamentales, ya que de esta manera se puede ajustar dicho parámetro a conveniencia (Syamaladevi, et al, 2016), en este caso se instalaron calefactores para llegar a una temperatura adecuada.

Como se puede observar en la Figura 13 en el proyecto se estableció que la temperatura estaría en un rango óptimo de 20 a 40 (°C) dado a investigadores como Ke, et al (2021),

cuyo rango de la temperatura fue constante y tuvo resultados favorables, porque la temperatura participa de manera activa cuando se trata de organismos vivos. Otros autores como Abdel y Mansour (2016), explican como la temperatura también afecta en la solubilidad del contaminante en el suelo, y los procesos bioquímicos realizados por los microorganismos, por ende, el monitoreo de las condiciones ambientales resulta en un punto imprescindible en el proceso de biorremediación (Iwamoto, & Nasu, 2001).

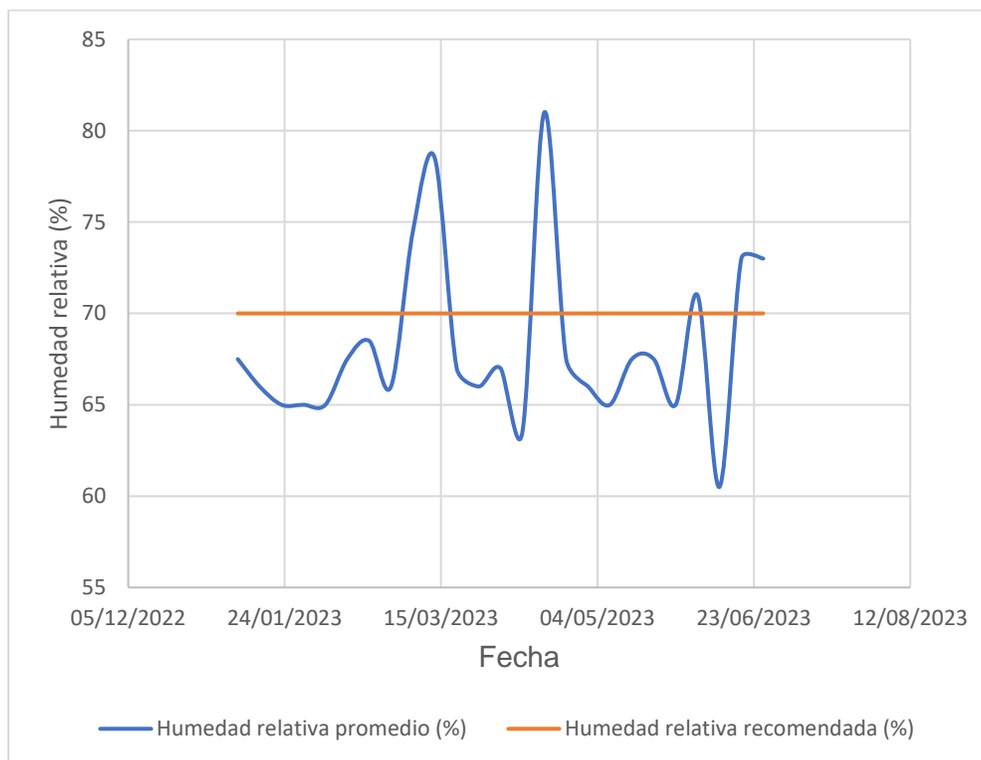


**Figura 13.** Monitoreo de la temperatura ambiente en el invernadero

De acuerdo con Meyer, et al (2023) la medición de la humedad relativa es de gran importancia, el motivo es que los microorganismos requieren cantidades de agua, estas no deben ser elevada e incurrir en la inhibición del metabolismo y evitar el crecimiento inadecuado de estos (Meyer, Guyot, Chalot, & Capelli, 2023).

Como se observa en la Figura 14, se tiene el comportamiento de la humedad relativa dentro del invernadero, ésta oscila ente valores de 60 % y 80 %, siendo así que, gracias

a la instalación de calefactores en el invernadero se consiguió ajustar la humedad para conseguir valores aceptables, ya que la humedad recomendada para este proceso de biorremediación es del 70 % según el autor Castillo (2017).

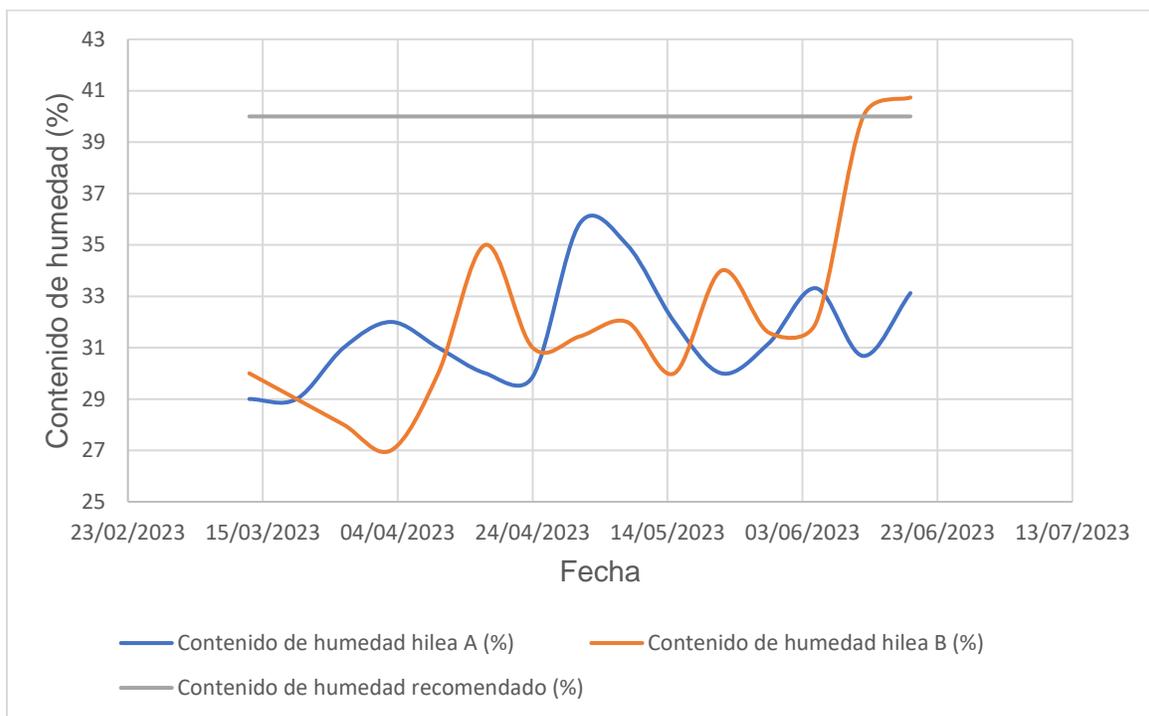


**Figura 14.** Medidas de humedad relativa del invernadero

### 3.2.5. Contenido de humedad del suelo con hidrocarburos

Los resultados del comportamiento promedio del contenido de humedad para las dos hileras A y B, medidas se presenta en la Tabla AIV del Anexo 4, mientras que en la Figura 15 se puede observar la tendencia que tuvo el contenido de humedad del suelo contaminado con hidrocarburos al compararlos con el valor recomendado del 40 % por el autor Castillo (2017). Para mantener la humedad el suelo era regado diariamente, pero existieron factores que afectaron en la retención de agua en las muestras, entre ellos se tiene el tipo de suelo (arenoso limoso) y su permeabilidad moderada, también el diseño de los recipientes que contaban con una perforación en la esquina inferior para drenar

los lixiviados. Por otro lado, se observa un aumento en el contenido de humedad para la hilera B en el mes de junio, esto se debió a que por poseer menor cantidad de cascarilla de arroz se debía suplir la baja retención de agua.



**Figura 15.** Contenido de humedad del suelo contaminado con hidrocarburos de la hilera A y B en función del tiempo comparadas con el valor recomendado

Dado que la humedad en el suelo afecta de forma directa en el proceso de biorremediación porque los microorganismos proliferan o inhiben su crecimiento dependiendo del contenido de agua presente en el medio, con la presencia de contaminantes hay que tomar en cuenta lo que Adams, et al (2015) indican al respecto, el exceso de agua en el proceso de biorremediación de suelos con hidrocarburos provoca el crecimiento de patógenos indeseables que no apoyen en el transcurso del proceso degradativo (Chen, et al, 2015).

### 3.2.6. Caracterización física de suelos con hidrocarburos

Los resultados de la caracterización física de las muestras de suelo con hidrocarburos se presentan en la Tabla 9, donde se observan los valores ponderados de los estudios granulométricos realizados por el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas

**Tabla 9.** Resultados de la granulometría del suelo contaminado con hidrocarburos de las hileras A y B

Tipo de suelo	Número de Tamiz	Tamaño del Tamiz (mm)	Porcentaje pasante hilera A (%)	Porcentaje pasante hilera B (%)
Grava	3/4 in	19,000	100,00	100,00
	3/8 in	9,500	99,33	95,89
	No. 4	4,750	90,56	88,33
Arena	No. 10	2,000	81,63	80,56
	No. 20	0,850	63,33	65,56
	No. 40	0,425	52,67	54,78
Limo	No. 60	0,250	49,78	46,89
	No. 100	0,150	44,89	45,89
	No. 140	0,106	38,56	34,22
	No. 200	0,075	32,00	31,00
Arcilla	Bandeja	<0.075	0,00	0,00

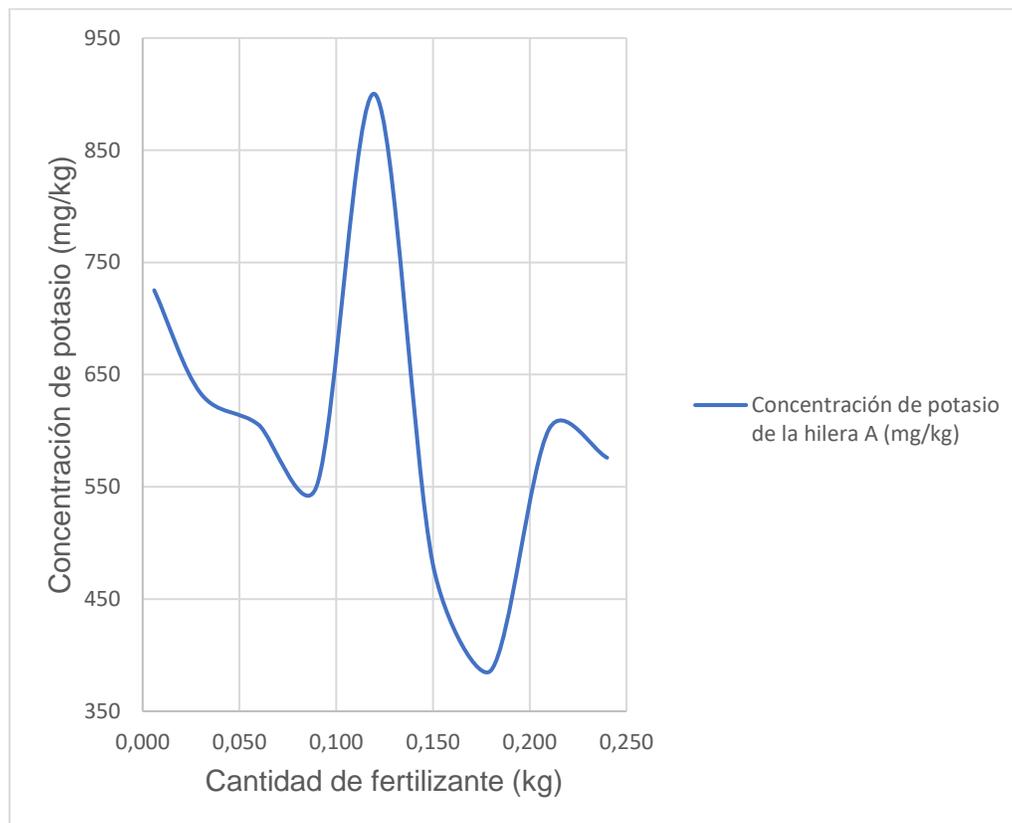
En la Tabla 9 se puede observar que el mayor porcentaje de retención del suelo corresponde a los tamices de entre 10 y 200 (arena y limo), correspondiendo al 59,06 % y 31,56 %, respectivamente.

Al ser una combinación de arenas y limosos, como explica Briones & Irigoien (2015), el suelo posee características mixtas, cuyas partículas son grandes y sueltas, esto hace que sea permeable, por otro lado, también está constituido por partículas finas de textura

suave, por ende, estas características permiten la retención de agua necesaria para el proceso de biorremediación (Rucks, et all, 2004).

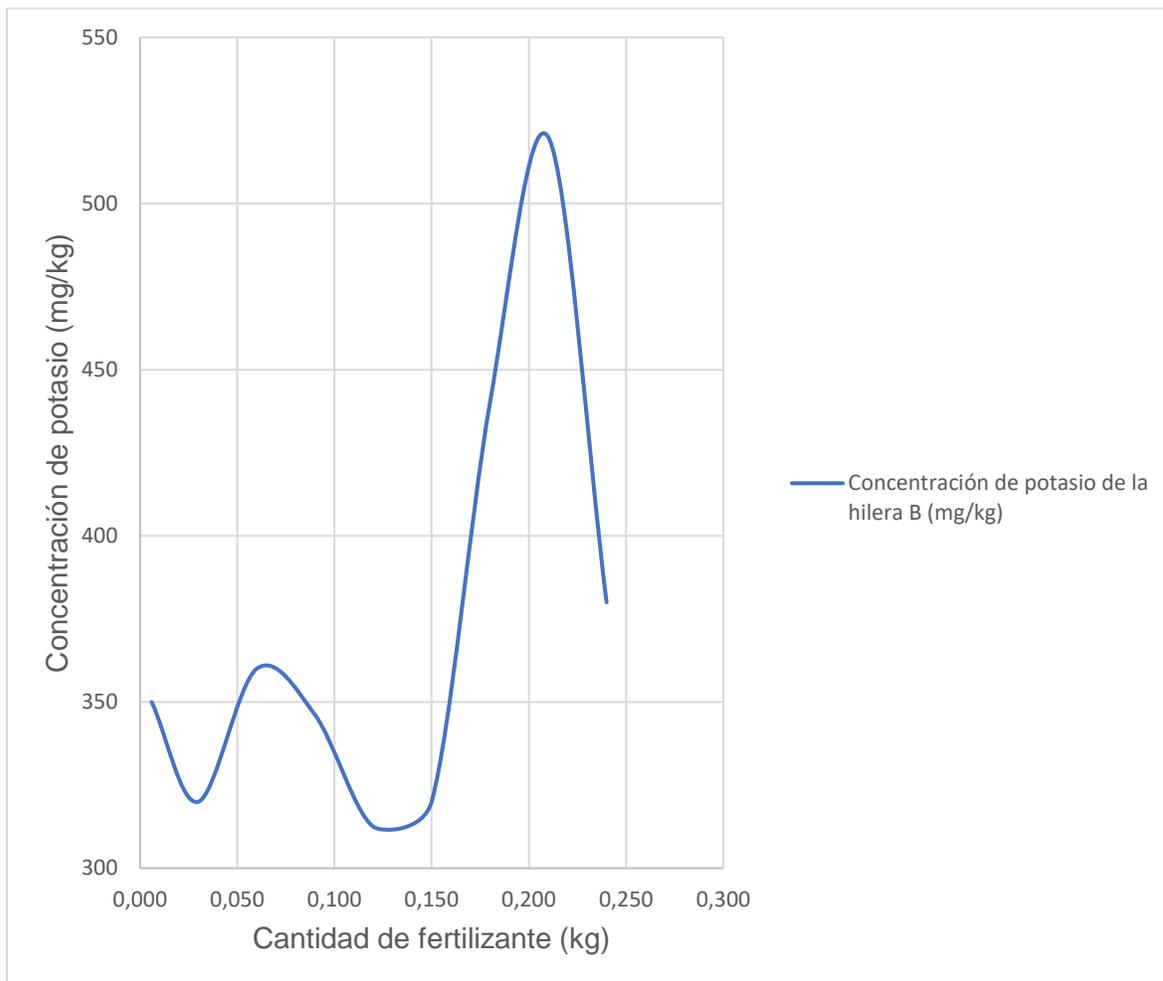
### 3.2.7. Potasio en suelos con hidrocarburos

En las Figuras 16 y 17 se puede observar la concentración de potasio presente en el suelo con hidrocarburos luego de haber adicionado el abono orgánico a las hileras A y B. Lamentablemente no se pudo establecer una relación entre la cantidad de abono orgánico suministrado y la concentración del potasio para satisfacer la relación NPK recomendado por Bedoya (2004).



**Figura 16.** Concentración de potasio en los suelos contaminados de la hilera A

Se esperaba la relación de que a mayor cantidad de abono esto representaría una mayor concentración de potasio, pero no se pudo comprobar dicha hipótesis por el comportamiento errático de los valores.

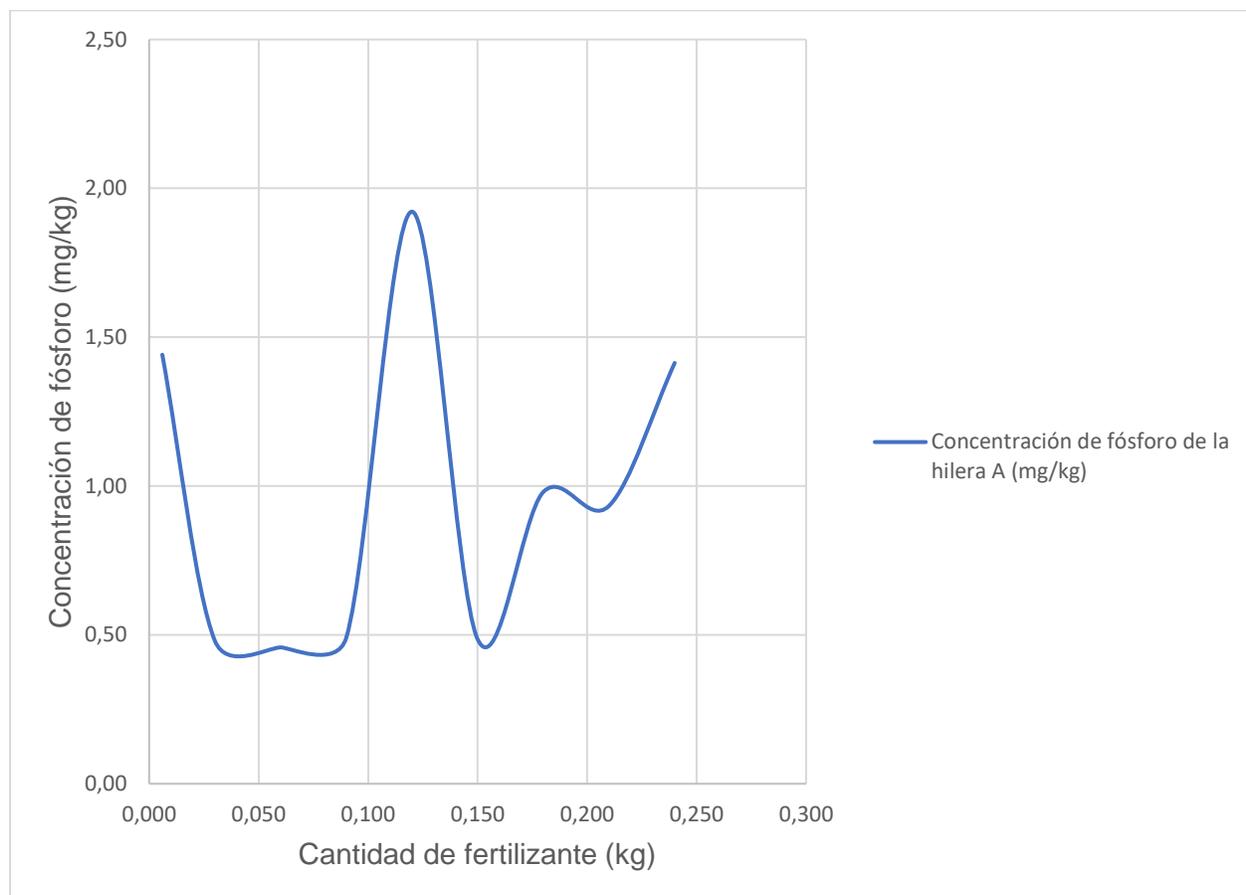


**Figura 17.** Concentración de potasio en los suelos contaminados de la hilera B

### 3.2.8. Fósforo Total en suelos con hidrocarburos

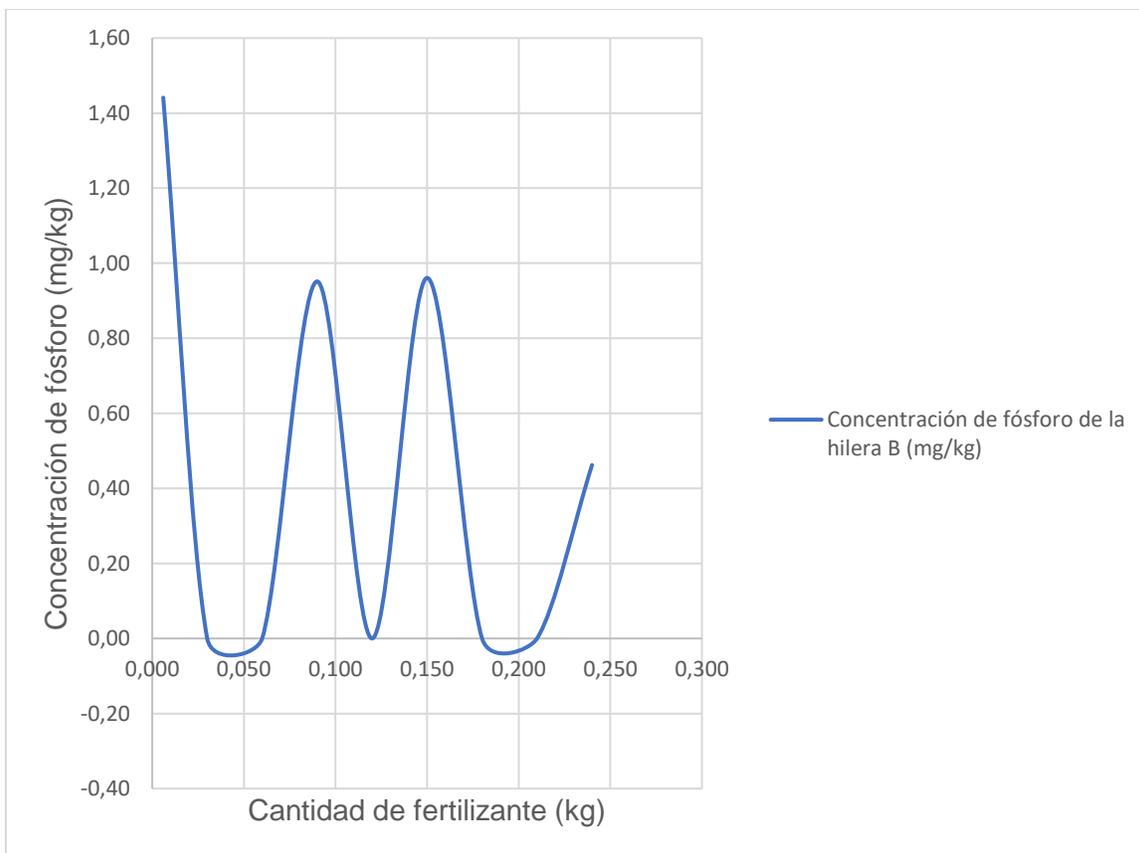
En las Figuras 18 y 19 se puede observar la concentración de fósforo presente en el suelo con hidrocarburos luego de haber adicionado el estiércol a las hileras A y B. Lamentablemente no se pudo establecer una relación entre la cantidad de abono

orgánico suministrado y la concentración del fósforo para satisfacer la relación de nutrientes recomendado por Bedoya (2004).



**Figura 18.** Concentración de fósforo en los suelos contaminados de la hilera A

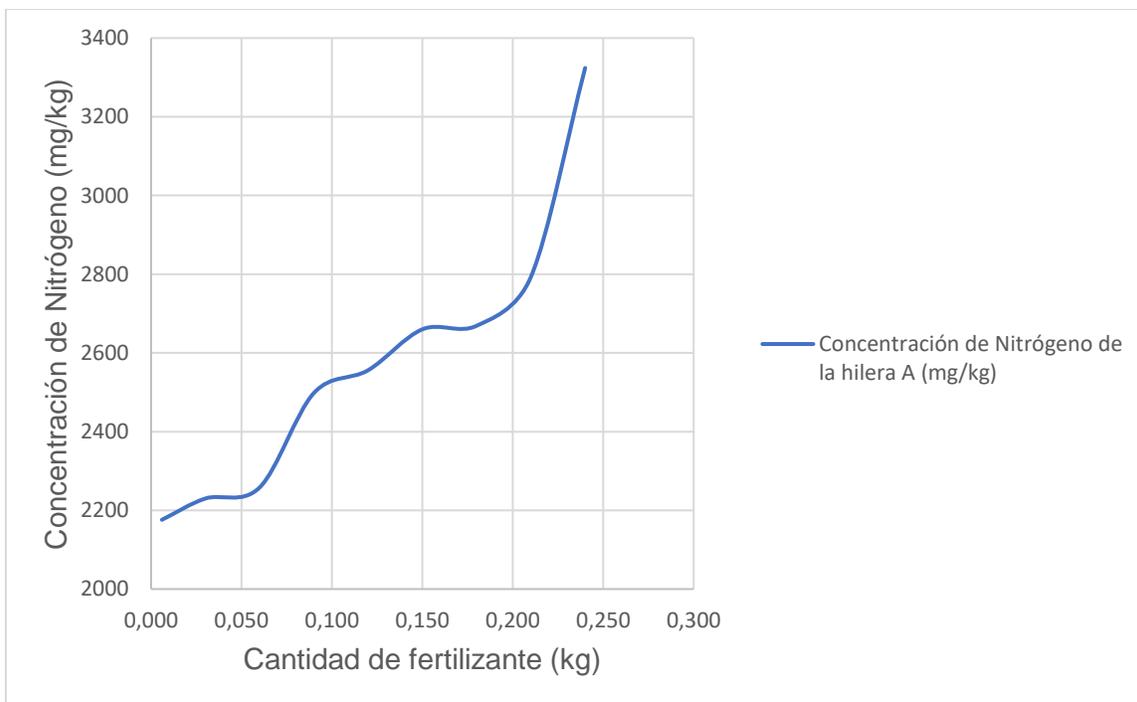
Como se observa en las Figuras 18 y 19 los resultados obtenidos de los análisis del fósforo a las muestras no mostraron una relación predecible entre la cantidad de abono adicionado y la concentración de fósforo presente en el abono, se esperaba la relación, de que a mayor cantidad de abono esto correspondería a una mayor concentración de fósforo, pero no se pudo comprobar dicha hipótesis por el comportamiento irregular de los resultados.



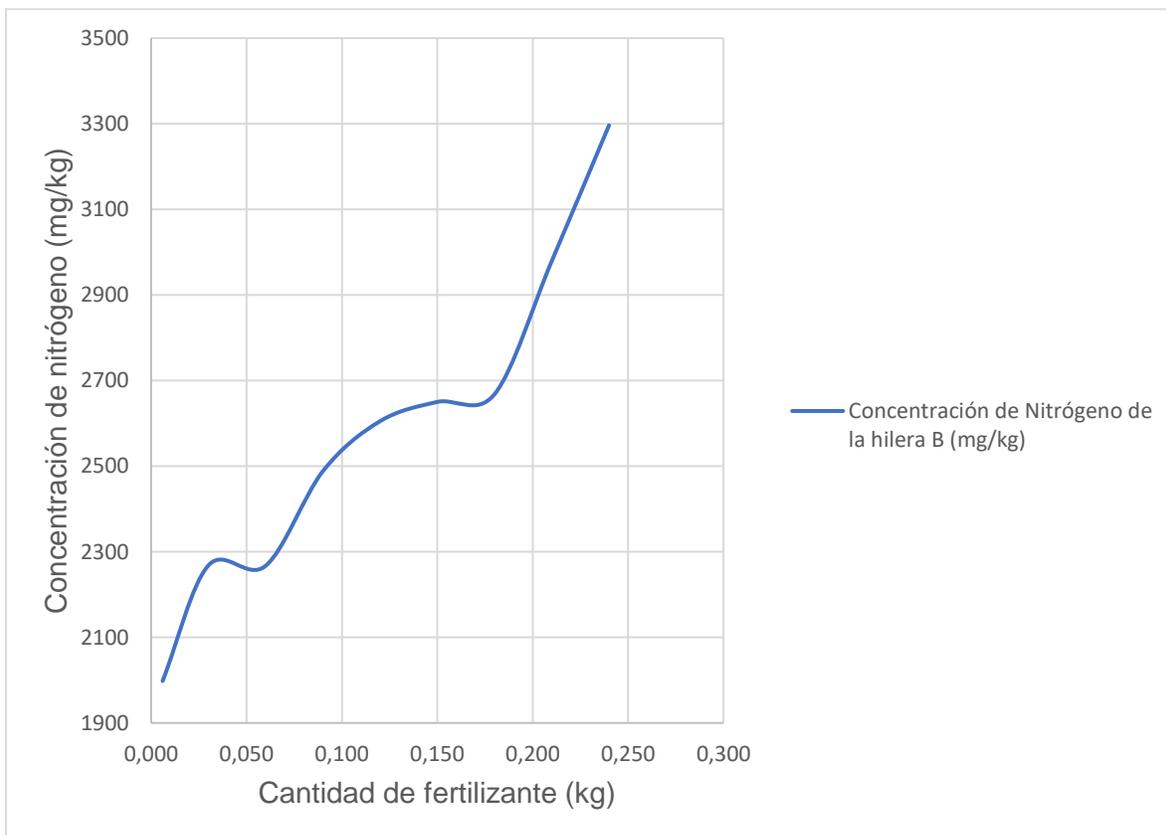
**Figura 19.** Concentración de fósforo en los suelos contaminados de la hilera B

### 3.2.9. Nitrógeno Total Kjeldahl en suelos con hidrocarburos

En las Figuras 20 y 21 se puede observar la concentración de nitrógeno presente en el suelo con hidrocarburos luego de haber adicionado el estiércol a las hileras A y B. Lamentablemente no se pudo establecer una relación entre en NPK del abono orgánico suministrado y la cantidad de suelo en la muestra para satisfacer la relación de nutrientes recomendado por Bedoya (2004).



**Figura 20.** Concentración de nitrógeno en los suelos contaminados de la hilera A

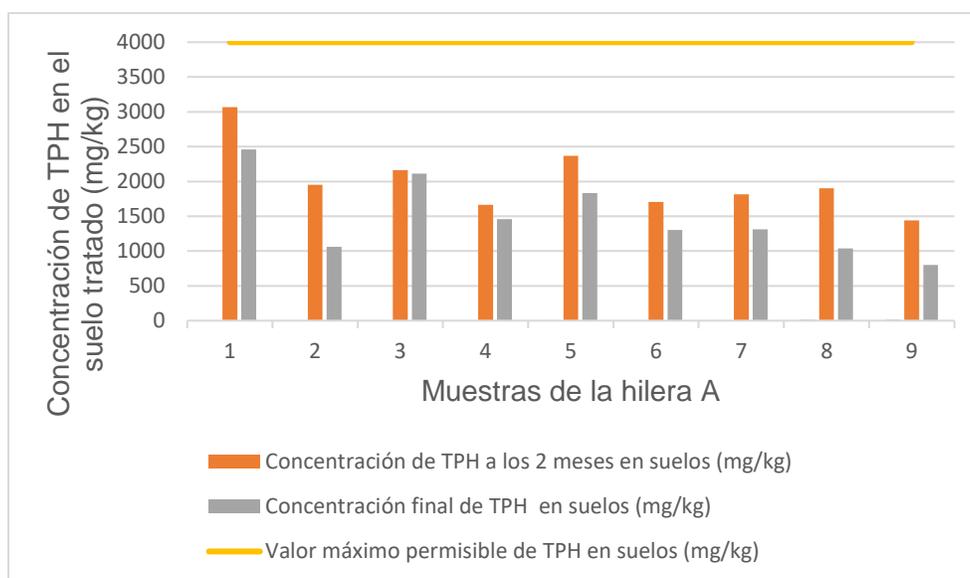


**Figura 21.** Concentración de nitrógeno en los suelos contaminados de la hilera B

Como se observa en las Figuras 20 y 21 los resultados obtenidos de los análisis del nitrógeno a las muestras mostraron una relación creciente entre la cantidad de abono adicionado y la concentración de nitrógeno, aquí se cumple la relación esperada, de que a mayor cantidad de abono esto correspondería a una mayor concentración de nitrógeno, pero al no poder establecer la relación de los otros dos nutrientes, esto imposibilita tener la relación de NPK para el proceso de biorremediación.

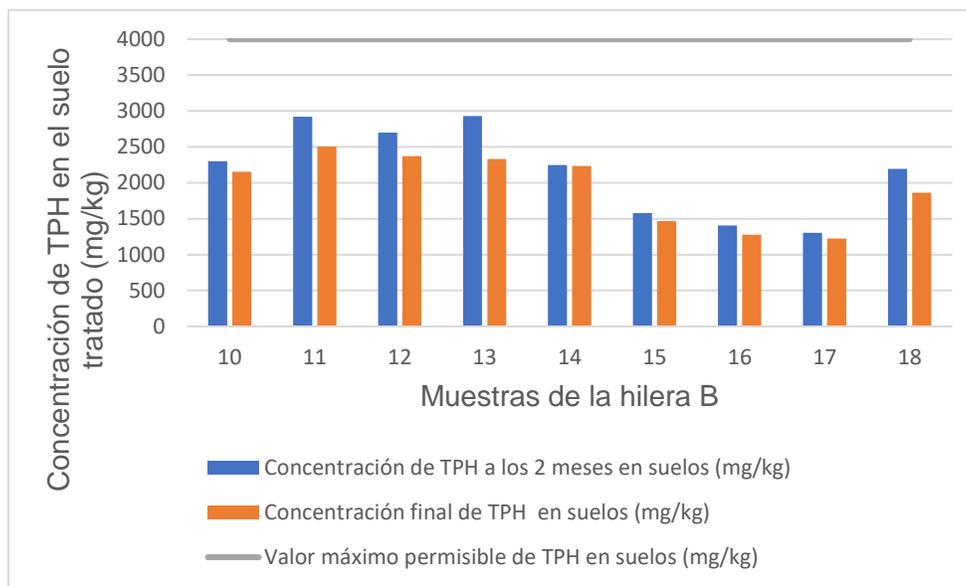
### 3.2.10. Hidrocarburos totales de petróleo en el suelo tratado

El parámetro de mayor importancia fue el contenido de hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en el suelo, este parámetro fue analizado en 3 ocasiones, primero se realizó a 5 muestras obtenidas en la empresa Hazwat, los resultados de este análisis se pueden observar en la sección (3.1), de estos se obtiene la concentración inicial de hidrocarburos en el suelo que se trató (14 466 mg/kg), el segundo análisis fue a los dos meses del proceso de biorremediación, donde el contenido de hidrocarburos bajó notablemente en las dos hileras (las 18 muestras analizadas) y el tercero fue dos meses después del segundo, así, se supo si era posible dar por concluido el proyecto.



**Figura 22.** Concentración de TPH para la hilera A en comparación con el valor máximo permisible del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

Estos resultados se aprecian en las Figura 22 y 23, además del valor máximo permisible según el TULSMA (2015). Con la excepción de no haber incluido la concentración inicial por el motivo de preservar la escala de las figuras y que los valores presentados en ellas se puedan apreciar de mejor manera.



**Figura 23.** Concentración de TPH para la hilera B en comparación con el valor máximo permisible del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

De acuerdo con el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (2015), Anexo 2 Tabla 3 “Criterios de Remediación o Restauración del suelo, los aceites y grasas siendo los hidrocarburos totales de petróleo, indica que para suelo de uso industrial el valor máximo permitido es de 4 000 (mg/kg), en donde, todos los resultados son menores a este límite, por ende, se cumplió la normativa vigente y el suelo puede ser utilizado para fines industriales. También se puede observar el caso de la muestra 9 de la hilera A, en términos de reducción de la concentración del contaminante fue la que obtuvo un mejor resultado, con un rendimiento del 94,28 %, llegando a un valor de 801 (mg/kg), esto se logró con un porcentaje del 10 % de cascarilla de arroz y 4 % de abono orgánico.

En las Tabla 10 y 11 se presentan los rendimientos de la degradación obtenidos para las hileras A y B, respectivamente, de cada muestra luego del proceso de biorremediación.

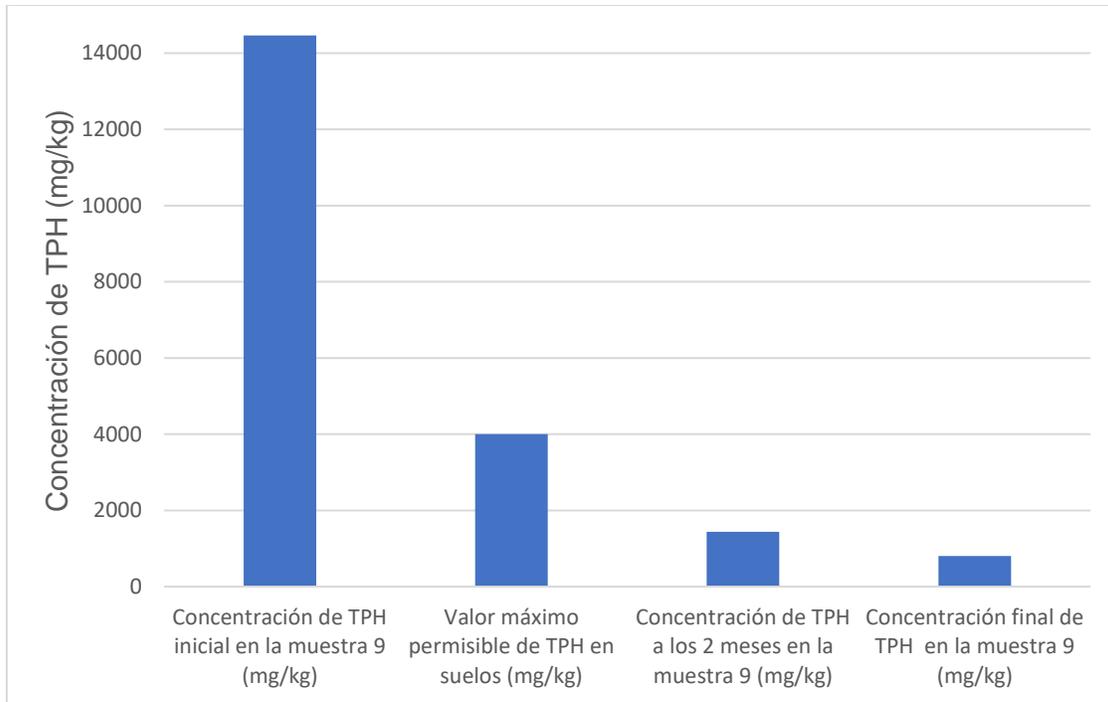
**Tabla 10.** Rendimiento de la degradación de TPH en suelos tratados de la hilera A

Muestra	Rendimiento de la hilera A (%)
1	82,43
2	92,41
3	84,92
4	89,57
5	86,91
6	90,68
7	90,64
8	92,58
9	94,28

**Tabla 11.** Rendimiento de la degradación de TPH en suelos tratados de la hilera B

Muestra	Rendimiento de la hilera B (%)
10	84,60
11	82,11
12	83,06
13	83,34
14	84,04
15	89,53
16	90,87
17	91,26
18	86,69

En la Figura 24 se muestran los valores de la concentración de TPH que tuvo la muestra 9 durante todo el proceso de biorremediación, para esta muestra se logró el mayor rendimiento de la degradación, siendo de 94,28 %, estos valores a su vez son comparados con el valor máximo permisible en suelo de uso industrial de 4000 (mg/kg).



**Figura 24.** Concentración de TPH de la muestra 9 durante la biorremediación

En la Tabla 12 se muestra un fragmento de la Tabla 3 Anexo 2 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente “Criterios de Remediación o Restauración del suelo”

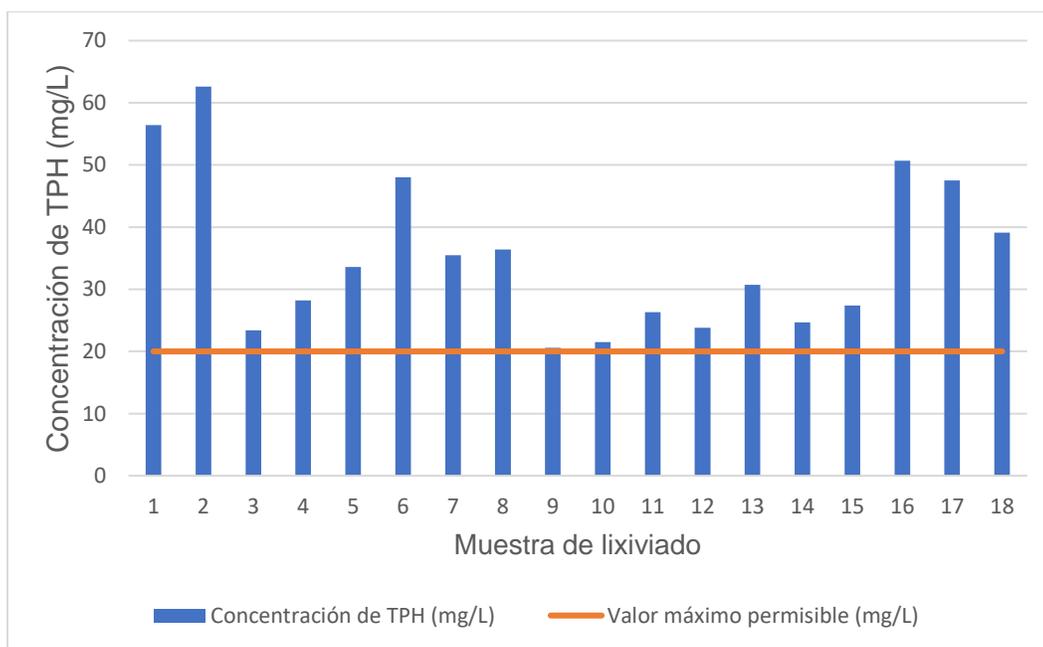
**Tabla 12.** Tabla 3 “Criterios de Remediación o Restauración del suelo” del TULSMA

Sustancia	Unidades (Concentración en peso seco)	Uso del suelo			
		Agrícola	Residencial	Comercial	Industrial
Aceites y grasas Hidrocarburos	mg/kg	500	<2 500	<4 000	<4 000

Fuente: TULSMA (2015)

### 3.2.11. Hidrocarburos totales de petróleo en lixiviados

Los lixiviados se recolectaron producto de regar diariamente con agua simulando la lluvia durante 16 semanas para mantener las muestras de suelo húmedas, las muestras se analizaron para contenido de hidrocarburos totales de petróleo, en la Figura 25 se observa que tienen valores significativos del contaminante, por ende, deben pasar por un proceso de gestión en Hazwat.



**Figura 25.** Resultados de hidrocarburos totales de petróleo (TPH's) en lixiviados

De acuerdo con el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (2015) en el Anexo 1 Libro VI Tabla 11. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público para Quito los valores en la Figura 25 superan el valor máximo permisible de hidrocarburos totales de petróleo de 20 mg/L para descargas al sistema de alcantarillado, por ende, estos lixiviados fueron tratados antes de su eliminación.

Del análisis de todos los resultados presentados anteriormente podemos inferir que, en el proceso de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, llevado a cabo

en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional en un invernadero en el edificio 10 de Hidráulica, logró cumplir con los objetivos planteados en la sección (1,1) y (1,2), además de obtener resultados de conductividad eléctrica menores al valor máximo permisible. El pH, temperatura ambiente, humedad relativa y contenido de humedad en los rangos óptimos para favorecer el desarrollo de los microorganismos, así se pudo lograr rendimientos de descontaminación de 82,43 % a 94,28 % para la hilera A y de 82,11 % a 91,26 % para la hilera B en un periodo de 4 meses.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- El suelo con el que se trabajó en la biorremediación contuvo 31,56 % de limos y 59,06 % de arenas, por lo que se consideró como un suelo arenoso limoso, con mediana retención de agua y semipermeable. El 9,39 % restante correspondió a partículas gruesas provenientes de gravas.
- En las hileras A y B se biodegradaron 54 kg de suelo contaminado con hidrocarburos usando los microorganismos propios del suelo, adicionando cascarilla de arroz y abono orgánico compuesto por estiércol de vaca y caballo.
- El contenido de humedad en el suelo osciló en valores establecido para la biorremediación por *Landfarming* dentro del invernadero, estos fueron de 29 % a 36 % en la hilera A y de 29 % a 41 % para la hilera B, y fue más notable la cantidad de humedad en la hilera B, que llegó a valores de 41 %, puesto que se añadió la mitad de cascarilla de arroz a comparación de la hilera A.
- El pH de ambas hileras (A y B) se mantuvo dentro del intervalo (ente 6 y 8), por lo tanto, durante el proceso de biorremediación no fue necesario la adición de sustancias reguladoras de pH.

- Las principales bacterias observadas en el suelo biorremediado fueron del tipo *Streptomyces* y *Micrococcus*, siendo estas gram positivas, y *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Chromobacterium*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Cytophaga*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Burkholderia*, *Aerobacter* y *Erwinia* siendo estas gram negativas, este tipo de microorganismos fueron las principales fuentes de la degradación, puesto que además el suelo presentó hongos: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Phymatotrichopsis*, *Verticillium* y *Rhizopus*, todo esto se evidenció en el momento de la identificación de microorganismos.
- La temperatura ambiente registrada dentro del invernadero durante el proceso de biorremediación estuvo dentro del rango recomendado (entre 20 y 40 °C), se trabajó con una temperatura promedio de 27 °C, para cumplir con este parámetro fue necesario la incorporación de dos calefactores.
- La humedad relativa durante la biorremediación en el invernadero fue de 64 %, valor próximo al recomendado que fue del 70 %, esto se logró con el sistema de calefacción instalado.
- Se concluye que se logró el objetivo de biorremediar los suelos contaminados con hidrocarburo desde 14 466 mg/kg de TPH hasta los valores máximos permisibles que cumplan lo que exige el TULSMA (2015) que es <4 000 mg/kg de TPH para suelo de uso industrial, en ambas hileras. Siendo en la hilera A, muestra 9, con porcentajes de cascarilla de arroz y abono orgánico del 10 % y 4 %, respectivamente la que llegó a un valor de 800 mg/kg de TPH, esto se logró en un periodo de tiempo de 16 semanas.
- Los lixiviados recolectados durante la biorremediación superan el valor norma de 20 mg/L de TPH TULSMA (2015), por este motivo se les dará un tratamiento adecuado antes de su eliminación.

- El desarrollo del proyecto tuvo diferentes costos tanto en el transporte de materia prima como en la construcción del invernadero y la adquisición de los recipientes para las muestras que se prepararon en cada hilera, los recipientes para la recolección de los lixiviados y la adquisición de los dos calefactores, pero de contarse con todos los materiales antes mencionados el proceso de biorremediación no representa un alto costo de inversión, de igual manera si se realiza *in situ* o en una zona cercana.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Se recomienda disponer de un área de trabajo para la instalación de las hileras, donde las condiciones ambientales de humedad y temperatura no varíen tanto, es decir, que de preferencia se mantengan dentro de los rangos recomendados en este proyecto, sin la necesidad de utilizar equipos de calefacción ni invernaderos.
- Se recomienda realizar el análisis de nitrógeno, fósforo y potasio, es decir, el contenido de nutrientes (NPK) al sustrato que se vaya a utilizar, al abono orgánico y al suelo contaminado (materia prima), antes de iniciar la biorremediación para poder realizar el balance de masas necesario y poder calcular la relación de NPK y ajustarlo a los valores recomendados.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel, H., & Mansour, M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>

Acuerdo Ministerial 097-A. (2015). Registro Oficial. Edición Especial N° 387 de 4 de noviembre de 2015. Ecuador.

Agreda F. (2013). Análisis de los impactos de la explotación petrolera en el Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2884>

Alvarado C. (2022). Las deudas ambientales de Ecuador en el 2022: derrames de petróleo, sentencias no cumplidas y el impacto imparable de la minería. Noticias ambientales. Recuperado de: <https://es.mongabay.com/2022/12/deudas-ambientales-de-ecuador-en-el-2022-derrames-de-petroleo-mineria/>

Apella C., & Araujo Z. (2005). Microbiología de agua. Conceptos básicos. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua, 33-50

Arboleda V. & Bravo V. (2010). Biorremediación del Suelo Contaminado con Hidrocarburos de la Central Hidroeléctrica del Campamento Secoya Mediate *Landfarming*. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/222>

Argumedo R., Alarcón A., Ferrera R., & Peña J. (2009). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos. Revista internacional de contaminación ambiental. Recuperado de: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992009000400006](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000400006)

Armendáriz R. (2023). Petroecuador confirma derrame de 1200 barriles de crudo en costa norte de Ecuador. Recuperado de: <https://www.vozdeamerica.com/a/petroecuador-confirma-derrame-1-200-barriles-crudo-costa-norte-ecuador-/7189568.html>

Asamblea Constituyente (2008). Constitución de la República del Ecuador. Recuperado de: [https://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/documents/old/constitucion\\_de\\_bolsillo.pdf](https://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/documents/old/constitucion_de_bolsillo.pdf)

ASTM International (2019). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

Ayala A. (2022) Tres derrames de petróleo en afluentes del Amazonas, en los ríos Napo y Coca, en la frontera Ecuador-Perú. Recuperado de: <https://aplaneta.org/2020/04/12/tres-derrame-de-petroleo-en-un-afluente-del-amazonas-en-el-rio-napo-en-la-frontera-ecuador-peru/>

Bedoya R. (2004). Implementación de un sistema *Landfarming* para un tratamiento de lodos contaminados con hidrocarburos Refinería Esmeraldas. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4310/1/20T00080.pdf>

Baird R., Eaton A., & Rice E., (2017) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd. ed., USA.

Briones, M., & Irigoien, N. (2015). Zonificación mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y la capacidad portante del suelo, para viviendas unifamiliares en la expansión urbana del anexo Lucmacucho Alto-sector Lucmacucho, distrito de Cajamarca. Recuperado de: <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/3232>

Bordino, J. (2021). *Biorremediación: qué es, tipos y ejemplos*. Recuperado de: <https://www.ecologiaverde.com/biorremediacion-que-es-tipos-y-ejemplos-3566.html#:~:text=Ventajas%20de%20la%20biorremediaci%C3%B3n,Demanda%20poca%20energ%C3%ADa>.

Brzeszcz, J., & Kaszycki, P. (2018). Aerobic bacteria degrading both n-alkanes and aromatic hydrocarbons: an undervalued strategy for metabolic diversity and flexibility. *Biodegradation*, 29, 359-407.

Cabrera M. (2013). Estudio de dos tipos de tratamientos a escala piloto para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos por el método de Landfarming. Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7080>

Cabrera L. (2015). Técnicas biológicas para la degradación de contaminantes. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8745>

Campos P. (2011). Biodegradación de ácido tereftálico es sistemas modelos aerobios. Recuperado de: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/jspui/handle/123456789/15749>

Carvajal D. (2020). Evaluación de los procedimientos de Biorremediación para el tratamiento de fluidos aceitosos (borras) en la industria de hidrocarburos del bloque Llanos34 ubicado en el municipio de Villanueva, Casanare.

Castillo P. (2017). Aplicación de la técnica de *landfarming* para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Recuperado de: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3113>

Castillo P. (2009). Aplicación de la técnica de *Landfarming* para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Recuperado de:

[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3113/ICI\\_171.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3113/ICI_171.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Castro J. (2014) Determinación de hidrocarburos en lodos residuales del tanque de almacenamiento de aceites usados de Etapa EP., posterior al tratamiento con Ecosoil, Sphag Sorb y compostaje. Recuperado de: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3699/1/10370.pdf>

Chen, M., Xu, P., Zeng, G., Yang, C., Huang, D., & Zhang, J. (2015). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes, and future research needs. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.05.003>

Chikere B., Chikere O., & Okpokwasili C. (2012). Bioreactor-based bioremediation of hydrocarbon-polluted Niger Delta marine sediment, Nigeria. 3 Biotech. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-011-0030-8>

Chirinos, I., Larreal, M., & Díaz, J. (2010). Biorremediación de lodos petroquímicos mediante el uso de la biota microbiana autóctona en un oxisol del municipio Lagunillas del estado Zulia, Venezuela. Revista Científica UDO Agrícola, 10(1), 133-140.

Corredor A. & Pérez I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. Revista Facultad de Ciencias Básicas. Recuperado de: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/3108>

Cruz H., Calleja, P., Herrera G., Marín R., Medinilla E., Salinas M., & Toledo, V. (2016). Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados mediante sistema de biopilas. Espacio I+ D, Innovación más desarrollo, 5(12). Recuperado de: <https://doi.org/10.31644/IMASD.12.2016.a04>

Cruz & Proaño (2010). Aplicación del biofilm (*Burkholderia cepacia*) como agente biorremediador en derrames de derivados de petróleo. Recuperado de: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/13730>

Cuvi, N., & Bejarano, M. (2015). Los halos de inhibición en la remediación de suelos amazónicos contaminados con petróleo. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 22, 1693-1714. <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/TXyyPdgyLDpHj3n5cPrtV4L/>

Estupiñán, J. (2005) Actividad petrolera en el Ecuador. Recuperado de: <https://docta.ucm.es/entities/publication/343c23a3-ff5b-40b7-8891-666dca2f138d>

García J., & Borrajo F. (2005). Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles. Caracterización, análisis y remediación. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/148651814.pdf>

García M. (2005). Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles: caracterización, análisis y remediación. Recuperado de: <https://oa.upm.es/400/>

Gupta, A., Gupta, R. & Singh, R. (2017). *Microbes and the environment. Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*, 43-84.

Hazwat (2022). *¿Quiénes Somos?* Recuperado de de: <https://www.hazwat.com.ec/nuestra-empresa/>

Ibérica S. (2019). BAC-ASILI: La biorremediación para el sector del tratamiento del agua. Agua. Recuperado de: <https://www.iaqua.es/noticias/sewervac-iberica/bac-asili-biorremediacion-sector-tratamiento-agua>.

INEN 863 (2011). Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio.

Iwamoto, T., & Nasu, M. (2001). Current bioremediation practice and perspective. *Journal of bioscience and bioengineering*. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80190-0](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80190-0)

Jara S. (2018). Biorremediación de suelos contaminados por petróleo en el Campo Libertador mediante la técnica de compostaje. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10546>

Jiménez R. (2017). Introducción a la contaminación de suelos. Ediciones Mundi-Prensa.

Ke, C., Qin, F., Yang, Z., Sha, J., Sun, W., Hui, J., & Zhang, X. (2021). Bioremediation of oily sludge by solid complex bacterial agent with a combined two-step process. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111673>

Lara C. (2011) Análisis multicriterio para priorización de zonas afectadas por derrames de petróleo. Recuperado de: <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/9546/2/TFLACSO-2016WRLC.pdf>

Lara W. (2016). Análisis multicriterio para priorización de zonas afectadas por derrames de petróleo. Recuperado de: <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/9546/2/TFLACSO-2016WRLC.pdf>

Lubbers, R. J., Dilokpimol, A., Visser, J., Hildén, K. S., Mäkelä, M. R., & de Vries, R. P. (2021). Discovery and functional analysis of a salicylic acid hydroxylase from

- Aspergillus niger*. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(6), e02701-20.  
Recuperado de: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/AEM.02701-20>
- Maguiña M., Ormea V., Ortiz C., Peñaranda K., & Rimac R. (2011). Procesos Biológicos en Organismo Animal-VT26-202101.
- Maier, R., & Soberon G. (2000). *Pseudomonas aeruginosa* rhamnolipids: biosynthesis and potential applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 54, 625-633.
- Mair, J., Schinner, F., & Margesin, R. (2013). A feasibility study on the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site: effects of temperature and biostimulation. *Journals Cold Regions Science and Technology*.  
Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.07.006>
- Manahan E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. Recuperado de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5NR8DIk1n68C&oi=fnd&pg=PP11&dq=Introducci%C3%B3n+a+la+qu%C3%ADmica+ambiental&ots=k7ImG3qfKi&sig=g3vLKsLgKoz6Pgoo\\_eKVLE1YGk#v=onepage&q=Introducci%C3%B3n%20a%20la%20qu%C3%ADmica%20ambiental&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5NR8DIk1n68C&oi=fnd&pg=PP11&dq=Introducci%C3%B3n+a+la+qu%C3%ADmica+ambiental&ots=k7ImG3qfKi&sig=g3vLKsLgKoz6Pgoo_eKVLE1YGk#v=onepage&q=Introducci%C3%B3n%20a%20la%20qu%C3%ADmica%20ambiental&f=false)
- Mayorga H. & Reyes B. (2022). Análisis de Derrames de Petróleo en el Campo Ancón Mediante Sistemas de Información Geográfica. *Revista Politécnica*, 49(1), 53-60.
- Mendo W. (2014). Alternativa de biorremediación con bacterias autóctonas de sedimento contaminado de la Laguna de Tamiahua, Veracruz, México. Recuperado de: <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/41954>
- Meyer, L., Guyot, S., Chalot, M., & Capelli, N. (2023). The potential of microorganisms as biomonitoring and bioremediation tools for mercury-contaminated soils. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115185>

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2005). Ministerio del ambiente. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente>.

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2008). Programa de Reparación Ambiental y Social (PRAS). Recuperado de: <https://www.ambiente.gob.ec/programa-de-reparacion-ambiental-y-social-pras/>

Mora Medina, F. A. (2016). Evaluación del efecto del pretratamiento mediante ozonación catalítica heterogénea sobre la producción fermentativa de hidrógeno, utilizando lixiviados de relleno sanitario como sustrato. Recuperado de: <http://repo.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/4011/1/40658.pdf>

Norma Oficial Mexicana (2014). Productos y servicios. Métodos de prueba microbiológicos. Determinación de microorganismos indicadores. Determinación de microorganismos patógenos NOM-210-SSA1-2014.

Obregón Maldonado, P. M. (2022). Determinación de las características fisicoquímicas y actividad emulsificante del ramnolípido producido por la cepa nativa *Pseudomonas aeruginosa* 6k-11. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/18286>

Parrini L. (2013). Chevro-Texaco: Crónica de un ecocidio criminal. Recuperado de: <http://lapalabrabierta.blogspot.com/2013/03/chevron-texaco-cronica-de-un-ecocidio.html>

Pesántez, M. & Castro, R. (2016). Potencial de cepas de *Trichoderma* spp. para la biorremediación de suelos contaminados con petróleo. *Biología Vegetal*, 16(4). Recuperado de: <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/541>

- Pucci, G., Acuña, A., Llanes, M., Tiedemann, M., & Pucci, O. (2009). Diversidad de bacterias cultivables de la costa de caleta olivia, patagonia, Argentina. Recuperado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120548X2009000300009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120548X2009000300009&script=sci_arttext)
- Rai, K. (2011). Studies on Rhizosphere micro flora of mandarin plants and their assessment as potential biocontrol agents against root diseases (Doctoral dissertation, University of North Bengal). Pag 12 a 15
- Revés, F., Figueroa, P., Probst, A., Kriszt, B., Banerjee, S., Szoboszlay, S. & Táncsics, A. (2020). Microaerobic conditions caused the overwhelming dominance of *Acinetobacter* spp. and the marginalization of *Rhodococcus* spp. in diesel fuel/crude oil mixture-amended enrichment cultures. *Archives of microbiology*, 202, 329-342.
- Rodríguez I. (2013). Reciclado en suelos de lodos de refinería: nuevas aproximaciones para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas. Recuperado de: <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/36685>
- Rodríguez A. & Arenas R. (2018). Hans Christian Gram y su tinción. *Dermatología cosmética, médica y quirúrgica*, 16(2), 166-167.
- Rodríguez A., Zárate G. & Bastida A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de ciencias ambientales*. Recuperado de: <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.9>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Recuperado de: <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>

Sánchez, M. I. G. (2010). Actividades biocatalíticas dependientes de peróxido de hidrógeno. Estudio cinético de los mecanismos y diseño de biosensores específicos.

Secretaría de economía (2006). suelos – hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría – método de prueba. México. NMX-AA-134-SCFI-2006-Gravimetría

Soler A., & Alcázar R. (2020). Evaluación de la capacidad de biodegradación de diésel por células libres e inmovilizadas de *Chromobacterium violaceum*. Recuperado de:

[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/ing\\_ambiental\\_sanitaria/article/2874/&path\\_info=41132154\\_41131161\\_2020.pdf](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/ing_ambiental_sanitaria/article/2874/&path_info=41132154_41131161_2020.pdf)

Syamaladevi, R., Tang, J., Villa, R., Sablani, S., Carter, B., & Campbell, G. (2016). Influence of water activity on thermal resistance of microorganisms in low-moisture foods: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12190>

Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (2015) Libro VI Anexo 2 Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación de suelos contaminados.

Ushco, D. (2021). Rediseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para Descarnes López de la parroquia la Península-Tungurahua. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16793>

Vanbergen, O., & Wintle, G. (2019). Lo esencial en Metabolismo y nutrición: Curso Crash. Elsevier Health Sciences.

- Varela, G., & Grotiuz, G. (2008). Fisiología y metabolismo bacteriano. Uruguay, Editorial Cefa, 43-58.
- Viñas Canals, M. (2005). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. Universidad de Barcelona. pág 74 a 78
- Vizuite R. (2011). Determinación de la capacidad biodegradadora de hidrocarburos de bacterias aisladas de suelos contaminados con petróleo (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Recuperado de: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/824>
- Voet, D., & Voet, J. G. (2006). Hemoglobina: función proteica en el microcosmo. Voet, D.; Voet, JG, Bioquímica,) 3ª. Edición, Argentina, Editorial Médica Panamericana, 333-370.
- Zárate, J. M. (2023). Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo: retos y oportunidades para Colombia en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

## 6. ANEXOS

### Anexo 1

#### CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Quito, D.M. 25 de agosto de 2023

De mi consideración

Yo, Lucia Margarita Montenegro Aguas en calidad de Director del Trabajo de Integración Curricular titulado "Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en la empresa Hazwat" elaborado por el estudiante José Alejandro Heredia Jaguaco de la carrera de Ingeniería Ambiental certifico que he empleado la herramienta Turnitin para la revisión de originalidad del documento escrito completo, producto del Trabajo de Integración Curricular indicado.

El documento escrito tiene un índice de similitud del 18 %

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el itinerario hacer uso del presente documento para los trámites de titulación.

NOTA: Se adjunta el informe generado por la herramienta Turnitin.

Atentamente,

---

Ing. Lucia Montenegro MSc.  
Directora del Trabajo de Integración Curricular  
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

## Anexo 2

**Tabla AI.** Métodos de análisis y procedimiento utilizados

Parámetro	Unidades	Método
Conductividad eléctrica	μS/cm	SM Ed.23, 2017,2510 B/ Electrométrico
pH	[H+]	SM Ed.23, 2017, 4500 - H+ B/ Electrométrico
Humedad relativa	%	SM Ed. 23, 2017, 2550 B/ Termometría
Temperatura ambiente	°C	SM Ed. 23, 2017, 2550 B/ Termometría
Contenido de humedad	%	NTE INEN-ISO 11461
Contenido de Grava	%	ASTM D4318 (Límite líquido, plástico)
Contenido de arena	%	ASTM D4318 (Límite líquido, plástico)
Contenido de finos	%	ASTM D4318 (Límite líquido, plástico)
Hidrocarburos Totales de Petróleo en suelo	%	NMX-AA-134-5CFI- 2006, Gravimetría
Hidrocarburos Totales de Petróleo en lixiviados	mg/L	SM Ed.23, 2017, 5520 F/ Gravimetría
Fósforo total	mg/kg	Método Olsen y
		HACH 8190 SM Ed.23, 2017, 4500- P E/ Espectrofotometría VIS
Nitrógeno total	mg/kg	HACH WATER ANALYSIS HANDBOOK, ED 7, 2012, 8075/ Volumetría
Potasio	mg/kg	SM Ed.23, 2017, 3500 - K /Espectrofotometría VIS
Identificación de microorganismos	Presencia/Ausencia	NOM-210SSA1-2014

**Anexo 3****Tabla AII.** Conductividad eléctrica del suelo contaminado medida al inicio y al final del proceso de biorremediación

Muestra	Conductividad eléctrica inicial (uS)	Conductividad eléctrica final (uS)
1	306,0	91,0
2	165,6	129,6
3	67,5,0	119,3
4	100,8	119,7
5	134,6	128,9
6	165,8	108,6
7	214,0	113,5
8	185,0	114,2
9	261,0	113,5
10	102,8	105,4
11	73,7	108,6
12	72,5	104,7
13	123,7	110,6
14	83,8	112,2
15	80,4	127,7
16	76,2	131,1
17	134,1	142,3
18	152,7	155,5

### Anexo 4

**Tabla AIII.** pH del suelo contaminado de las hileras A y B durante el proceso de biorremediación

Fecha	pH de la hilera A	pH de la hilera B
13/3/2023	6,38	6,80
20/3/2023	6,09	6,34
27/3/2023	6,17	6,90
3/4/2023	6,20	6,50
10/4/2023	6,22	6,26
17/4/2023	6,70	6,53
24/4/2023	6,33	6,84
1/5/2023	6,40	6,76
8/5/2023	6,34	6,85
15/5/2023	6,38	6,88
22/5/2023	6,56	6,51
29/5/2023	6,51	6,51
5/6/2023	6,80	6,85
12/6/2023	6,42	6,76
19/6/2023	6,40	6,90
26/6/2023	6,48	6,51

## Anexo 5

**Tabla AIV.** Contenido de humedad promedio del suelo contaminado de la hilera A y B durante el proceso de biorremediación

Fecha	Contenido de humedad hilea A (%)	Contenido de humedad hilea B (%)
13/3/2023	29	30
20/3/2023	29	29
27/3/2023	31	28
3/4/2023	32	27
10/4/2023	31	30
17/4/2023	30	35
24/4/2023	30	31
1/5/2023	36	31
8/5/2023	35	32
15/5/2023	32	30
22/5/2023	30	34
29/5/2023	31	32
5/6/2023	33	32
12/6/2023	31	40
19/6/2023	33	41

## Anexo 6

Tabla AV. Criterios de Remediación o Restauración del suelo normado por el TULSMA

Sustancia	Unidades de concentración de peso seco	Suelo			
		Agrícola	Residencial	Comercial	Industrial
Parámetros Generales	-	-	-	-	-
Conductividad	mmhos/cm	2	2	4	4
pH	-	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Parámetros Inorgánicos	-	-	-	-	-
Arsénico	mg/kg	12	15	15	15
(inorgánico)	-	-	-	-	-
Azufre (elemental)	mg/kg	500	-	-	-
Bario	mg/kg	750	500	2000	2000
Boro (soluble agua caliente)	mg/kg	2	-	-	-
Cadmio	mg/kg	2	5	10	10
Cobalto	mg/kg	40	50	300	300
Cobre	mg/kg	63	63	91	91
Cromo Total	mg/kg	65	65	90	90
Cromo VI	mg/kg	0.4	0.4	1.4	1.4
Cianuro (libre)	mg/kg	0.9	0.9	8.0	8.0
Estaño	mg/kg	5	50	300	300
Flúor (total)	mg/kg	200	400	2000	2000
Mercurio	mg/kg	0.8	2	10	10
(inorgánico)	-	-	-	-	-
Molibdeno	mg/kg	5	10	40	40
Níquel	mg/kg	50	100	100	100
Plata	mg/kg	20	20	40	40
Plomo	mg/kg	100	100	150	150
Selenio	mg/kg	2	3	10	10

**Tabla AV.** Criterios de Restauración o Remediación del suelo normado por el TULSMA

(Continuación ...)

Sustancia	Unidades de concentración de peso seco	Suelo			
		Agrícola	Residencial	Comercial	Industrial
Talio	mg/kg	1	1	1	1
Vanadio	mg/kg	130	130	130	130
Zinc	mg/kg	200	200	380	380
Parámetros orgánicos	-	-	-	-	-
Aceites y Grasas	mg/kg	500	<2 500	<4 000	<4 000
Hidrocarburos	-	-	-	-	-
Aromáticos	-	-	-	-	-
Monocíclicos	-	-	-	-	-
Benceno	mg/kg	0.05	0.5	5	5
Etilbenceno	mg/kg	0.1	1.2	20	20
Estireno	mg/kg	0.1	5	50	50
Tolueno	mg/kg	0.1	0.8	0.8	0.8
Xileno	mg/kg	0.1	1	17	20
Compuestos	-	-	-	-	-
Fenólicos	-	-	-	-	-
Clorofenoles	mg/kg	0.05	0.5	5	5
Fenoles (total)	mg/kg	3.8	3.8	3.8	3.8
Hidrocarburos	mg/kg	<2		<5	<1
aromáticos	-	-	-	-	-
policiclicos	-	-	-	-	-
Benzo(a)antraceno	mg/kg	0.1	1	1	1
Benzo(a)pirenos	mg/kg	0.1	0.7	0.7	0.7

**Anexo 7****Tabla AVI.** Límites permisibles para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, según lo normado por el RAOHE (Cabrera, 2013)

Parámetro	Unidad	Uso de suelo		
		Agrícola	Industrial	Ecosistemas sensibles
Concentración de TPH	mg/kg	<2 500	<4 000	<1 000







CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS

Código de Informe: SUCS-23-004  
Fecha de Informe: 2023-05-05  
Página: 03 de 04

Nombre del Cliente: **SENA**  
Dirección: **Calle República y Avenida Bolívar**  
Código Postal: **170100**

Nombre del Proyecto: **ACTIVIDAD**  
Descripción: **Proyecto de Tuberías Dimensionamiento de tuberías**  
Cantante: **--**  
Contratista: **--**  
Prestador: **--**  
Fecha de entrega: **2023-03-27**  
Preparado por: **ING. E. VILLAC**

Datos de clasificación	
Identificación	2
Muestra	--
Procedimiento	--
Presencia de material orgánico	0
Presencia de sales	0
Indicador de humedad	0
Indicador de plasticidad	0
Nombre completo de muestra	100000

Resumen de pruebas	
Contenido de humedad (%)	0
Límite Líquido (%)	76 (partic)
Límite Plástico (%)	76 (partic)
Índice de plasticidad (%)	76 (partic)
Clasificación SUCS	
US	Residual

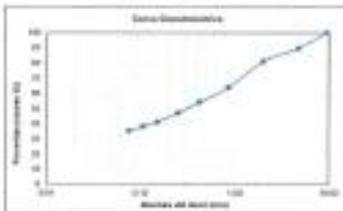
Características físicas		
ASTM D 2954	Módulo 1	
	1	2
Masa específica	2.65	2.65
Masa específica sobre humedad (g)	16.67	16.68
Masa específica sobre sólidos (g)	62.34	62.42
Incremento de humedad (%)	64	64

SUCS SUCS		
ASTM D 2954		
Módulo de ruptura	--	--
Resistencia (g)	--	--
Resistencia y coeficiente (g)	--	--
Resistencia y coeficiente (g)	--	--
Resistencia de tracción (g)	--	--

Características químicas		
ASTM D 4182	1	2
Masa específica	--	--
Masa específica sobre humedad (g)	--	--
Masa específica sobre sólidos (g)	--	--
Incremento de humedad (%)	--	--

Resumen de resultados de clasificación	
Presencia de arena (%)	0
Contenido de arena (%)	0
Presencia de limo (%)	0
Contenido de limo (%)	0
Presencia de arcilla (%)	0
Contenido de arcilla (%)	0

Resistencia SUCS SUCS		
ASTM D 2954		
Resistencia (g)	Resistencia sobre humedad (g)	Resistencia sobre sólidos (g)
200	1333	1333
50	333	333
100	667	667
150	1000	1000
200	1333	1333
250	1667	1667
300	2000	2000
350	2333	2333
400	2667	2667
450	3000	3000
500	3333	3333
550	3667	3667
600	4000	4000
650	4333	4333
700	4667	4667
750	5000	5000
800	5333	5333
850	5667	5667
900	6000	6000
950	6333	6333
1000	6667	6667



**Observaciones:** El método de preparación de los especímenes de ensayo de fricción simple y límite plástico requiere el uso de procedimientos especiales para el ensayo de granulometría mecánica de suelos. La muestra es representativa de la zona que se está estudiando y se debe mantener en el laboratorio de la muestra SUCS SUCS. La información proporcionada por el cliente, técnica, identificación de la muestra, ubicación y profundidad, muestra contra representación con el método especificado en el presente informe. El presente informe es válido únicamente para las condiciones técnicas de ensayo. El contenido del presente informe no puede reproducirse ni pararse ni utilizarse en la publicación del LEMSUR.

*[Firma manuscrita]*  
Ing. E. Villac  
JEFE DE LABORATORIO







**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
 LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS**

Código de Informe: 2023.07.01 Fecha de Informe: 2023.07.01 Hoja 02 de 02  
**DATOS DEL CLIENTE**  
 Razón social: J28 Algodón Harina, S.A.S.  
 Dirección: Luján de la Cruz 879-200 y Huancabamba Fecha: 2023.07.01  
**DATOS DEL PROYECTO**  
 Proyecto: Prueba de Estabilidad de Esqueleto de concreto  
 Contratado: ---  
 Contratista: ---  
 Fiscalizador: ---  
 Servicio: ASISTENCIAL  
 Fecha de entrega: 2023.07.01  
 Temperatura de prueba (T<sub>0</sub>): 19.1 ± 0.5

Muestra de estudio	
Identificación	0
Muestra	---
Identificación SU	---
Presencia de la muestra original	0
Presencia de humedad	0
Existencia de humedad	1 (si) / 0 (no)
Temperatura de prueba	19.1 ± 0.5

Muestra de estudio	
Condición de humedad SU	0
Grado de humedad SU	0
Grado de plasticidad PI	0
Grado de consistencia LI	0
Modificación SU2	
0	0

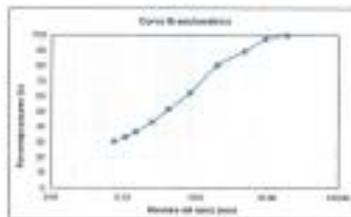
Presencia de humedad ASTM D153	Muestra 0	
	1	0
Muestra de agua	0.0%	0.0%
Muestra de agua libre (w <sub>l</sub> )	0.0%	0.0%
Muestra de agua total (w <sub>t</sub> )	0.0%	0.0%
Existencia de humedad SU	0	0

Ley de Liquidación ASTM D153		
Presencia de agua	---	---
Muestra de agua	---	---
Muestra de agua libre (w <sub>l</sub> )	---	---
Muestra de agua total (w <sub>t</sub> )	---	---
Muestra de agua libre (w <sub>l</sub> )	---	---
Existencia de humedad SU	---	---

Grado de humedad ASTM D153	
Muestra de agua	---
Muestra de agua libre (w <sub>l</sub> )	---
Muestra de agua total (w <sub>t</sub> )	---
Existencia de humedad SU	---

Muestra de estudio de clasificación	
Condición de agua SU	11
Condición de arena SU	0

Gradación ASTM D153		
Tamaño de Criba	Temperatura (°C)	Porcentaje Retenido (%)
75µ	0.075	0
150µ	0.150	0
300µ	0.300	0
600µ	0.600	0
75µ	0.075	0
150µ	0.150	0
300µ	0.300	0
600µ	0.600	0
75µ	0.075	0
150µ	0.150	0
300µ	0.300	0
600µ	0.600	0
Retenido	1.000	0





**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS**



**CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS**

Código de Informe: 0000000000  
 Fecha de Informe: 2023-05-28  
 Fecha de Emisión: 2023-05-28  
 Proyecto: Propuesta de Estudios Remediación de suelos  
 Cliente: INE  
 Ubicación: Lote de Suelos E13-054-010000  
 Fecha de Muestreo: 2023-05-28  
 Temperatura de ensayo (T<sub>0</sub>): 19 ± 0

Datos de la muestra	
Identificación	SI
Material	---
Substrato de origen	---
Resistencia de penetración	SI
Resistencia de tensión	SI
Estados de humedad	---
Caracterización de pedregos	SI
Caracterización de pedregos	SI

Análisis de consistencia	
Contenido de humedad (w)	SI
Índice de plasticidad (PI)	SI
Índice de actividad (AI)	SI
Índice de consistencia (CI)	SI
Clasificación (USCS)	SI
Clasificación (UCS)	SI

Muestra de humedad	Muestra SI	
	1	2
Masa original (g)	10.000	10.000
Masa original y agua (g)	10.000	10.000
Masa original y agua (g)	10.000	10.000
Contenido de humedad (w)	SI	SI

Muestra de plasticidad	Muestra SI	
	1	2
Masa original (g)	---	---
Masa original y agua (g)	---	---
Masa original y agua (g)	---	---
Contenido de humedad (w)	---	---

Lote y estado	Muestra SI	
	1	2
Masa original (g)	---	---
Masa original y agua (g)	---	---
Masa original y agua (g)	---	---
Contenido de humedad (w)	---	---

Resistencia de tensión de flexión	
Resistencia de tensión (f <sub>t</sub> )	SI
Resistencia de tensión (f <sub>t</sub> )	SI
Resistencia de tensión (f <sub>t</sub> )	SI
Resistencia de tensión (f <sub>t</sub> )	SI
Resistencia de tensión (f <sub>t</sub> )	SI

Módulo de elasticidad		
Módulo de elasticidad		Módulo de elasticidad
Grupos de suelo	Módulo de elasticidad (MPa)	Porcentaje relativo (%)
Gr 1	4.000	100
Gr 2	4.750	119
Gr 3	5.500	138
Gr 4	6.250	156
Gr 5	7.000	175
Gr 6	7.750	194
Gr 7	8.500	213
Gr 8	9.250	232
Gr 9	10.000	250
Gr 10	10.750	269
Gr 11	11.500	288
Gr 12	12.250	307
Gr 13	13.000	326
Gr 14	13.750	345
Gr 15	14.500	364
Gr 16	15.250	383
Gr 17	16.000	402
Gr 18	16.750	421
Gr 19	17.500	440
Gr 20	18.250	459
Gr 21	19.000	478
Gr 22	19.750	497
Gr 23	20.500	516
Gr 24	21.250	535
Gr 25	22.000	554
Gr 26	22.750	573
Gr 27	23.500	592
Gr 28	24.250	611
Gr 29	25.000	630
Gr 30	25.750	649
Gr 31	26.500	668
Gr 32	27.250	687
Gr 33	28.000	706
Gr 34	28.750	725
Gr 35	29.500	744
Gr 36	30.250	763
Gr 37	31.000	782
Gr 38	31.750	801
Gr 39	32.500	820
Gr 40	33.250	839
Gr 41	34.000	858
Gr 42	34.750	877
Gr 43	35.500	896
Gr 44	36.250	915
Gr 45	37.000	934
Gr 46	37.750	953
Gr 47	38.500	972
Gr 48	39.250	991
Gr 49	40.000	1010
Gr 50	40.750	1029
Gr 51	41.500	1048
Gr 52	42.250	1067
Gr 53	43.000	1086
Gr 54	43.750	1105
Gr 55	44.500	1124
Gr 56	45.250	1143
Gr 57	46.000	1162
Gr 58	46.750	1181
Gr 59	47.500	1200
Gr 60	48.250	1219
Gr 61	49.000	1238
Gr 62	49.750	1257
Gr 63	50.500	1276
Gr 64	51.250	1295
Gr 65	52.000	1314
Gr 66	52.750	1333
Gr 67	53.500	1352
Gr 68	54.250	1371
Gr 69	55.000	1390
Gr 70	55.750	1409
Gr 71	56.500	1428
Gr 72	57.250	1447
Gr 73	58.000	1466
Gr 74	58.750	1485
Gr 75	59.500	1504
Gr 76	60.250	1523
Gr 77	61.000	1542
Gr 78	61.750	1561
Gr 79	62.500	1580
Gr 80	63.250	1600
Gr 81	64.000	1619
Gr 82	64.750	1638
Gr 83	65.500	1657
Gr 84	66.250	1676
Gr 85	67.000	1695
Gr 86	67.750	1714
Gr 87	68.500	1733
Gr 88	69.250	1752
Gr 89	70.000	1771
Gr 90	70.750	1790
Gr 91	71.500	1809
Gr 92	72.250	1828
Gr 93	73.000	1847
Gr 94	73.750	1866
Gr 95	74.500	1885
Gr 96	75.250	1904
Gr 97	76.000	1923
Gr 98	76.750	1942
Gr 99	77.500	1961
Gr 100	78.250	1980
Gr 101	79.000	2000
Gr 102	79.750	2019
Gr 103	80.500	2038
Gr 104	81.250	2057
Gr 105	82.000	2076
Gr 106	82.750	2095
Gr 107	83.500	2114
Gr 108	84.250	2133
Gr 109	85.000	2152
Gr 110	85.750	2171
Gr 111	86.500	2190
Gr 112	87.250	2209
Gr 113	88.000	2228
Gr 114	88.750	2247
Gr 115	89.500	2266
Gr 116	90.250	2285
Gr 117	91.000	2304
Gr 118	91.750	2323
Gr 119	92.500	2342
Gr 120	93.250	2361
Gr 121	94.000	2380
Gr 122	94.750	2400
Gr 123	95.500	2419
Gr 124	96.250	2438
Gr 125	97.000	2457
Gr 126	97.750	2476
Gr 127	98.500	2495
Gr 128	99.250	2514
Gr 129	100.000	2533
Gr 130	100.750	2552
Gr 131	101.500	2571
Gr 132	102.250	2590
Gr 133	103.000	2609
Gr 134	103.750	2628
Gr 135	104.500	2647
Gr 136	105.250	2666
Gr 137	106.000	2685
Gr 138	106.750	2704
Gr 139	107.500	2723
Gr 140	108.250	2742
Gr 141	109.000	2761
Gr 142	109.750	2780
Gr 143	110.500	2800
Gr 144	111.250	2819
Gr 145	112.000	2838
Gr 146	112.750	2857
Gr 147	113.500	2876
Gr 148	114.250	2895
Gr 149	115.000	2914
Gr 150	115.750	2933
Gr 151	116.500	2952
Gr 152	117.250	2971
Gr 153	118.000	2990
Gr 154	118.750	3009
Gr 155	119.500	3028
Gr 156	120.250	3047
Gr 157	121.000	3066
Gr 158	121.750	3085
Gr 159	122.500	3104
Gr 160	123.250	3123
Gr 161	124.000	3142
Gr 162	124.750	3161
Gr 163	125.500	3180
Gr 164	126.250	3200
Gr 165	127.000	3219
Gr 166	127.750	3238
Gr 167	128.500	3257
Gr 168	129.250	3276
Gr 169	130.000	3295
Gr 170	130.750	3314
Gr 171	131.500	3333
Gr 172	132.250	3352
Gr 173	133.000	3371
Gr 174	133.750	3390
Gr 175	134.500	3409
Gr 176	135.250	3428
Gr 177	136.000	3447
Gr 178	136.750	3466
Gr 179	137.500	3485
Gr 180	138.250	3504
Gr 181	139.000	3523
Gr 182	139.750	3542
Gr 183	140.500	3561
Gr 184	141.250	3580
Gr 185	142.000	3600
Gr 186	142.750	3619
Gr 187	143.500	3638
Gr 188	144.250	3657
Gr 189	145.000	3676
Gr 190	145.750	3695
Gr 191	146.500	3714
Gr 192	147.250	3733
Gr 193	148.000	3752
Gr 194	148.750	3771
Gr 195	149.500	3790
Gr 196	150.250	3809
Gr 197	151.000	3828
Gr 198	151.750	3847
Gr 199	152.500	3866
Gr 200	153.250	3885
Gr 201	154.000	3904
Gr 202	154.750	3923
Gr 203	155.500	3942
Gr 204	156.250	3961
Gr 205	157.000	3980
Gr 206	157.750	4000
Gr 207	158.500	4019
Gr 208	159.250	4038
Gr 209	160.000	4057
Gr 210	160.750	4076
Gr 211	161.500	4095
Gr 212	162.250	4114
Gr 213	163.000	4133
Gr 214	163.750	4152
Gr 215	164.500	4171
Gr 216	165.250	4190
Gr 217	166.000	4209
Gr 218	166.750	4228
Gr 219	167.500	4247
Gr 220	168.250	4266
Gr 221	169.000	4285
Gr 222	169.750	4304
Gr 223	170.500	4323
Gr 224	171.250	4342
Gr 225	172.000	4361
Gr 226	172.750	4380
Gr 227	173.500	4400
Gr 228	174.250	4419
Gr 229	175.000	4438
Gr 230	175.750	4457
Gr 231	176.500	4476
Gr 232	177.250	4495
Gr 233	178.000	4514
Gr 234	178.750	4533
Gr 235	179.500	4552
Gr 236	180.250	4571
Gr 237	181.000	4590
Gr 238	181.750	4609
Gr 239	182.500	4628
Gr 240	183.250	4647
Gr 241	184.000	4666
Gr 242	184.750	4685
Gr 243	185.500	4704
Gr 244	186.250	4723
Gr 245	187.000	4742
Gr 246	187.750	4761
Gr 247	188.500	4780
Gr 248	189.250	4800
Gr 249	190.000	4819
Gr 250	190.750	4838
Gr 251	191.500	4857
Gr 252	192.250	4876
Gr 253	193.000	4895
Gr 254	193.750	4914
Gr 255	194.500	4933
Gr 256	195.250	4952
Gr 257	196.000	4971
Gr 258	196.750	4990
Gr 259	197.500	5009
Gr 260	198.250	5028
Gr 261	199.000	5047
Gr 262	199.750	5066
Gr 263	200.500	5085
Gr 264	201.250	5104
Gr 265	202.000	5123
Gr 266	202.750	5142
Gr 267	203.500	5161
Gr 268	204.250	5180
Gr 269	205.000	5200
Gr 270	205.750	5219
Gr 271	206.500	5238
Gr 272	207.250	5257
Gr 273	208.000	5276
Gr 274	208.750	5295
Gr 275	209.500	5314
Gr 276	210.250	5333
Gr 277	211.000	5352
Gr 278	211.750	5371
Gr 279	212.500	5390
Gr 280	213.250	5409
Gr 281	214.000	5428
Gr 282	214.750	5447
Gr 283	215.500	5466
Gr 284	216.250	5485
Gr 285	217.000	5504
Gr 286	217.750	5523
Gr 287	218.500	5542
Gr 288	219.250	5561
Gr 289	220.000	5580
Gr 290	220.750	5600
Gr 291	221.500	5619
Gr 292	222.250	5638
Gr 293	223.000	5657
Gr 294	223.750	5676
Gr 295	224.500	5695
Gr 296	225.250	5714
Gr 297	226.000	5733
Gr 298	226.750	5752
Gr 299	227.500	5771



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS**



**CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS**

Código de informe: 2023-02-001  
 Fecha de informe: 2023.05.02

Página 02 de 02

**DATOS DEL CLIENTE**

Nombre cliente: S.A. Algodón Verde Jirón  
 Dirección: Calle de General Efraín Cárdenas

Teléfono: 00381 2700

**DATOS DEL PROYECTO**

Proyecto: Vialidad Mejorada - Boleadoras grandes  
 Contratista: ---  
 Cantidad de: ---  
 Ubicación: ---  
 Material: ASFALTO

Fecha de ensayo: 2023-05-02  
 Temperatura de ensayo (T<sub>0</sub>): 19.1 °C

Datos de la muestra	
Identificación	7
Almacén	---
Referencia (m)	---
Procedencia de la muestra (origen)	SI
Medio de transporte	SI
Exposición de humedad	---
Exposición de aire	---
Exposición de golpes	---
Exposición de vibración	---
Exposición de partículas	12.36 mm

Resultados de consistencia	
Consistencia líquida (L)	71
Consistencia plástica (P)	10
Índice de Plasticidad (IP)	61
Índice de consistencia (IC)	10

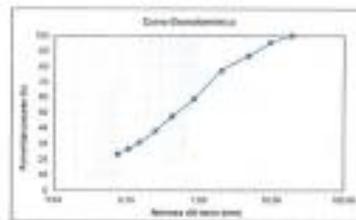
Cantidad de humedad (AMBE 01)	Muestra 7	
	1	2
Muestra líquida (g)	0.173	0.100
Muestra líquida y contenido de agua (g)	49.951	49.549
Muestra líquida y contenido de agua (g)	44.400	43.237
Contenido de humedad (H)	51	47

Límite Líquido (L) y Límite Plástico (P) (AMBE 02)			
Índice de plasticidad	---	---	---
Índice de consistencia	---	---	---
Muestra líquida y contenido de agua (g)	---	---	---
Muestra líquida y contenido de agua (g)	---	---	---
Contenido de humedad (H)	---	---	---

Límite Líquido (L) y Límite Plástico (P) (AMBE 03)	
Muestra líquida (g)	---
Muestra líquida y contenido de agua (g)	---
Muestra líquida y contenido de agua (g)	---
Contenido de humedad (H)	---

Resultados de actividad de arcillas (AMBE 04)	
Actividad de arcilla (A)	10
Actividad de arcilla (A)	10
Actividad de arcilla (A)	23
Actividad de arcilla (A)	---
Actividad de arcilla (A)	---

Normalización (AMBE 05)		
Muestra 7		Muestra 0
Temperatura ambiente	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
20°C	20.000	20
30°C	2.500	30
40°C	4.000	40
50°C	5.500	50
60°C	7.000	60
70°C	8.500	70
80°C	10.000	80
90°C	11.500	90
100°C	13.000	100
110°C	14.500	110
120°C	16.000	120
Temperatura	17.500	0



**Observaciones:** El método de ensayo utilizado para el ensayo de consistencia líquida se basa en la norma ASTM D 2008. El método de preparación de las muestras para el ensayo de consistencia líquida se basa en la norma ASTM D 2008. El método de preparación de las muestras para el ensayo de consistencia plástica se basa en la norma ASTM D 2008. La información presentada en este informe es el resultado de la muestra utilizada y el laboratorio que realizó el ensayo. Los resultados de los ensayos de laboratorio se basan en las condiciones de ensayo que se utilizaron. El contenido del presente informe no constituye un asesoramiento ni una garantía de resultados. El contenido del presente informe no constituye un asesoramiento ni una garantía de resultados.

*[Firma]*  
 Ing. Silvestre Viterbo  
 JEFE DE LABORATORIO























**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
 LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS**

Código de Informe: 8.10.25.03-1  
 Fecha de Informe: 2020-06-02  
 Oficina del Cliente: **Asociación de Inquilinos de Quito**  
 Dirección: **Los Hornos de Guano, E1-123 y Andacollo**  
 Teléfono: 0994 077000  
 Proyecto: **Proyecto de Estudios Geomecánicos de suelos**  
 Ubicación: **---**  
 Cuidad: **---**  
 País: **---**  
 Puntaje: **---**  
 Nombre: **ASOCIACIÓN**  
 Fecha de ensayo: 2020-05-21  
 Temperatura de ensayo (°C): 140.5

Datos de ensayo	
Identificación	18
Alcance	---
Profundidad	---
Presión de ensayo (kg/cm²)	10
Presión de contacto	10
Relaciones de humedad	---
Wetted soil	---
Wetted soil weight	100.00g

Datos de ensayo	
Estado de humedad (%)	10
Wetted soil (%)	10
Wetted soil weight (%)	10
Wetted soil weight (%)	10
Wetted soil weight (%)	10
Wetted soil weight (%)	10
Wetted soil weight (%)	10
Wetted soil weight (%)	10
Wetted soil weight (%)	10

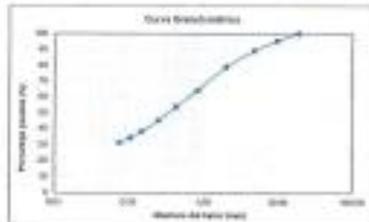
Estado de humedad	Límite A	
	1	2
Wetted soil (%)	10	10
Wetted soil weight (%)	10	10
Wetted soil weight (%)	10	10
Wetted soil weight (%)	10	10
Wetted soil weight (%)	10	10

Estado de humedad	Límite B	
	1	2
Wetted soil (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---

Estado de humedad	Límite C	
	1	2
Wetted soil (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---
Wetted soil weight (%)	---	---

Datos de ensayo de humedad	
Wetted soil (%)	---
Wetted soil weight (%)	---
Wetted soil weight (%)	---
Wetted soil weight (%)	---
Wetted soil weight (%)	---

Relaciones de humedad		
Temperatura	Wetted soil (%)	Wetted soil weight (%)
10	10	10
20	10	10
30	10	10
40	10	10
50	10	10
60	10	10
70	10	10
80	10	10
90	10	10
100	10	10
110	10	10
120	10	10
130	10	10
140	10	10
150	10	10
160	10	10
170	10	10
180	10	10
190	10	10
200	10	10



**Observaciones:** La curva de ensayo obtenida para definir el estado de consistencia de los suelos de ensayo a la temperatura ambiente. El método de procesamiento de los resultados de ensayo de consolidación es el método de la norma ASTM D2487. La muestra es un suelo de tipo arcilloso y se ha determinado el estado de consistencia de la muestra de ensayo de acuerdo a la norma ASTM D2487. Los resultados obtenidos en el ensayo de consolidación se han determinado de acuerdo a la norma ASTM D2487. El resultado de procesamiento de los resultados de ensayo de consolidación se ha determinado de acuerdo a la norma ASTM D2487.

*[Firma manuscrita]*  
 Ing. Mercedes Villacís  
 JEFE DE LABORATORIO

