

UNIVERSIDAD DE HUANUCO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL



TESIS

**“Efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en
aguas contaminadas con hidrocarburos”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: Amado Huertas, José Alejandro

ASESOR: Vásquez Baca, Yasser

HUÁNUCO – PERÚ

2025

U

D

H



UDH
UNIVERSIDAD DE HUANUCO
<http://www.udh.edu.pe>

TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Contaminación Ambiental
AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)

CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería ambiental

Disciplina: Ingeniería ambiental y geológica

DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título Profesional de Ingeniero ambiental.

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 71494498

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 42108318

Grado/Título: Título oficial de máster universitario en planificación territorial y gestión ambiental

Código ORCID: 0000-0002-7136-697X

DATOS DE LOS JURADOS:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Camara Llanos, Frank Erick	Maestro en ciencias de salud con mención en salud pública y docencia universitaria	44287920	0000-0001-9180-7405
2	Morales Aquino, Milton Edwin	Maestro en ingeniería con mención en gestión ambiental y desarrollo sostenible	44342697	0000-0002-2250-3288
3	Romero Estacio, Jorge Antonio	Maestro en gestión pública para el desarrollo social	22520481	0009-0000-2063-4076



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 17:00 horas del día 22 del mes de julio del año 2025, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

- Mg. Frank Erick Camara Llanos (Presidente)
- Mg. Milton Edwin Morales Aquino (Secretario)
- Mg. Jorge Antonio Romero Estacio (Vocal)

Nombrados mediante la **Resolución N° 1459-2025-D-FI-UDH**, para evaluar la Tesis intitulada: **"EFECTO FITORREMEDIADOR DE LA LENTEJA DE AGUA (*Lemna minor*) EN AGUAS CONTAMINADAS CON HIDROCARBUROS"**, presentado por el (la) Bach. **AMADO HUERTAS, JOSE ALEJANDRO**; para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas; procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) aprobado. Por unanimidad con el calificativo cuantitativo de 1.2 y cualitativo de suficiente. (Art. 47)

Siendo las 18 horas del día 22 del mes de julio del año 2025, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.

Mg. Frank Erick Camara Llanos
DNI: 44287920
ORCID: 0000-0001-9180-7405
Presidente

Mg. Milton Edwin Morales Aquino
DNI: 44342697
ORCID: 0000-0002-2250-3288
Secretario

Mg. Jorge Antonio Romero Estacio
DNI: 22520481
ORCID: 0009-0000-2063-4076
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: JOSE ALEJANDRO AMADO HUERTAS, de la investigación titulada "Efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos", con asesor(a) YASSER VASQUEZ BACA, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 2015-2023-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA AMBIENTAL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 25 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 22 de mayo de 2025



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

150. Amado Huertas, José Alejandro..docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

25%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

8%

2

repositorio.cientifica.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%



RICHARD J. SOLIS TOLEDO

D.N.I.: 47074047

cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA

D.N.I.: 71345687

cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

A mis progenitores, por impulsarme a lograr mis más grandes aspiraciones, demostrándome que la vida está llena de retos y dificultades que pueden ser superadas y lograr el éxito. Porque ellos son el pilar fundamental desde mi concepción.

A mi gran amor, Marianela, en tributo a su comprensión, cariño y amor brindado. Tu presencia en mi vida ha sido sustancial y un regalo invaluable. Este logro es nuestro.

AGRADECIMIENTO

A Dios, porque me ha guiado en todo este camino, otorgándome pensamiento crítico y analítico para el logro de mis objetivos.

A mis progenitores, que me inculcaron valores éticos y morales, con principios de honestidad y respeto hacia las personas sin importar su condición económica o social. Por sus sabios consejos y confianza depositada en mí, sin importar las adversidades de la vida.

A Marianela, por acompañarme en mi etapa profesional y la vida misma e impulsarme a lograr mis metas, ser mi inspiración y por confiar en mí.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE ANEXOS	X
ÍNDICE DE FÓRMULAS	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN	XIV
CAPÍTULO I	15
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	15
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	17
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	17
1.3 OBJETIVO GENERAL	17
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.7.1 VIABILIDAD ECONÓMICA	19
1.7.2 VIABILIDAD TÉCNICA	19
1.7.3 VIABILIDAD AMBIENTAL	19
1.7.4 VIABILIDAD SOCIAL	19
CAPÍTULO II	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	20
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	20
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES	24
2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES	25

2.2 BASES TEÓRICAS	26
2.2.1 SISTEMA DE PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES.....	26
2.2.2 CLASES DE PLANTAS ACUÁTICAS	26
2.2.3 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	27
2.2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO BASADOS EN ACRÓFITAS SUMERGIDAS	31
2.2.5 FITORREMEDIACIÓN	31
2.2.6 LAS FITOTECNOLOGÍAS DE FITORREMEDIACIÓN	33
2.2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN	36
2.2.8 EFICIENCIA DE FITORREMEDIACIÓN	37
2.2.9 ASOCIACIONES EN LA FITORREMEDIACIÓN.....	39
2.2.10 NUTRIENTES EN LA FITORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS	39
2.2.11 HUMEDALES CON AGUA CONTAMINADA POR HIDROCARBUROS	40
2.2.12 HIDROCARBUROS	41
2.2.13 DIÉSEL	45
2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES	46
2.3.1 AGENTE	46
2.3.2 AMBIENTE ACUÁTICO	46
2.3.3 BIOACUMULACIÓN	46
2.3.4 BIODISPONIBILIDAD	47
2.3.5 CADENA DE CUSTODIA.....	47
2.3.6 CONCENTRACIÓN	47
2.3.7 CONTAMINANTE	47
2.3.8 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	48
2.3.9 DERRAME	48
2.3.10 DERRAME DE PETRÓLEO.....	48
2.3.11 ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA)	48
2.3.12 FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS F1	48
2.3.13 FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS F2	49
2.3.14 FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS F3	49

2.3.15 HIDROCARBUROS	49
2.3.16 HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA (F1)	50
2.3.17 HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN MEDIA (F2)	50
2.3.18 HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN PESADA (F3)	50
2.3.19 MATRIZ AMBIENTAL	50
2.3.20 MUESTRA SIMPLE	50
2.3.21 POBLACIÓN	50
2.3.22 PUNTO DE MUESTREO	51
2.3.23 RELACIÓN CAUSA-EFECTO	51
2.3.24 REMEDIACIÓN	51
2.3.25 RÍOS	51
2.3.26 PETRÓLEO	51
2.4 HIPÓTESIS	52
2.4.1 HIPÓTESIS ALTERNA (H1)	52
2.4.2 HIPÓTESIS NULA (H0)	52
2.5 VARIABLES	52
2.5.1 VARIABLE DE CALIBRACIÓN	52
2.5.2 VARIABLE EVALUATIVA	52
2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	53
CAPÍTULO III	54
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	54
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
3.1.1 ENFOQUE	54
3.1.2 ALCANCE O NIVEL	55
3.1.3 DISEÑO	55
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	56
3.2.1 POBLACIÓN	56
3.2.2 MUESTRA	56
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	58
3.3.1 PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	58

3.3.2PREPARACIÓN PREVIA A LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	59
3.3.3 RECOLECCIÓN DE DATOS.....	59
3.3.4 TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....	62
CAPÍTULO IV.....	64
RESULTADOS.....	64
4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS	64
4.1.1DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA.....	64
4.1.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TPH EN LAS MUESTRAS DE AGUA.....	64
4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	66
4.2.1 ESTADÍSTICO DESCRIPTIVOS.....	66
4.2.2 HIPÓTESIS.....	67
4.2.3 PRUEBA DE HIPÓTESIS	68
CAPÍTULO V.....	72
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
5.1 CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS.....	72
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Mecanismos de fitorremediación	34
Tabla 2 Operacionalización de variables	53
Tabla 3 Grupo experimental de investigación	56
Tabla 4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	59
Tabla 5 Técnicas de análisis e interpretación de datos para la investigación	62
Tabla 6 Resultados del análisis de TPH en las muestras de agua	65
Tabla 7 Estadísticos descriptivos del estudio	67
Tabla 8 Prueba de muestras independientes	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Humedal de flujo superficial	28
Figura 2 Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal	30
Figura 3 Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical	31
Figura 4 Simbiosis en sistemas de fitorremediación	33
Figura 5 Cadenas moleculares de carbono-carbono	41
Figura 6 Fórmula de algunos hidrocarburos cíclicos saturados	43
Figura 7 Fórmula de algunos hidrocarburos alifáticos insaturados	45
Figura 8 Esquema de diseño	55
Figura 9 Unidades experimentales de investigación	57
Figura 10 Esquema de ejecución del experimento	58
Figura 11 Concentración de TPH en las muestras de agua	65
Figura 12 Recolección de agua natural del Río Huallaga	90
Figura 13 Unidades experimentales	90
Figura 14 Unidades experimentales con agua natural.....	91
Figura 15 Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE0.....	91
Figura 16 Aireación en la unidad experimental para la emulsión entre el Diésel DB5-S50 y el agua natural.....	92
Figura 17 Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE1....	92
Figura 18 Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE2....	93
Figura 19 Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE3....	93
Figura 20 Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE4....	94
Figura 21 Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE5....	94
Figura 22 Aireación en las unidades experimentales para la emulsión entre el Diésel DB5-S50 y el agua natural	95
Figura 23 Proceso de fitorremediación en las unidades experimentales....	95
Figura 24 Toma de muestra de la UE0 para su análisis de TPH en laboratorio	96
Figura 25 Toma de muestra de la UE1 UE2 UE3 UE4 UE5 para su análisis de TPH en laboratorio.....	96

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia	81
Anexo 2 Plano de ubicación del proyecto	82
Anexo 3 Diagrama de causa y efecto	83
Anexo 4 Diagrama de medios y fines	84
Anexo 5 Ficha ubicación del punto de monitoreo	85
Anexo 6 Cadena de custodia de monitoreo	86
Anexo 7 Ficha de cadena de custodia	87
Anexo 8 Resultado del análisis de TPH (pre test).....	88
Anexo 9 Resultado del análisis de TPH (post test)	89

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1	Fórmula general de los hidrocarburos alifáticos saturados o alcanos	42
Fórmula 2	Fórmula desarrollada de los hidrocarburos de cadena recta... ..	42
Fórmula 3	Fórmula del isopentano	42

RESUMEN

La presente investigación nace por la necesidad de encontrar alternativas asequibles y económicas para hacer frente a los derrames de combustibles fósiles, pues estos eventos constituyen un significativo impacto ambiental negativo. Ante ello, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos, considerando que la investigación es de nivel aplicativo, del tipo experimental, prospectivo, longitudinal y analítico.

Para los fines de la investigación la metodología empleada se centró en la evaluación de los datos recolectados, antes y después de la intervención mediante análisis de laboratorio, para determinar si la lenteja de agua (*Lemna minor*) logró o no un efecto fitorremediador significativo en el agua contaminada con Diésel B5 S50. Es así como, se emplearon seis (06) unidades experimentales (UE₀, UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ y UE₅) donde se agregó 2 L de agua natural por cada una y posteriormente fueron inyectadas con 0.2 mL de Diésel B5 S50, para luego suministrar el oxígeno (4 L/s) y lograr la emulsión entre estos. Luego de esto se colectó la primera muestra (UE₀) y se envió al laboratorio para el análisis de TPH, resultando en 39.84 mg/L de TPH. Transcurrido los catorce (14) días de tratamiento, se colectaron muestras de las demás unidades experimentales (UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ y UE₅) para su análisis, dando como resultado en las concentraciones de TPH para la UE₁ en 1.58 mg/L, la UE₂ en 0.52 mg/L, la UE₃ en 2.62 mg/L, la UE₄ en 1.48 mg/L y para la UE₅ en 0.80 mg/L. Considerando estos resultados y que, el agua natural con la que se hizo la investigación está considerada como Categoría 4 “conservación del ambiente acuático” y, además, de acuerdo con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua, el estándar de calidad del recurso hídrico para TPH es de 0.5 mg/L, la investigación pudo reducir notablemente la concentración de TPH al punto de estar próximo al ECA.

Por lo tanto, la investigación concluye la lenteja de agua (*Lemna minor*) tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

Palabras clave: Hidrocarburo, diésel, fitorremediación, lenteja de agua, ECA.

ABSTRACT

This research was born out of the need to find affordable and economical alternatives to deal with fossil fuel spills, since these events constitute a significant negative environmental impact. In view of this, the objective of the research was to evaluate the phytoremediation effect of duckweed (*Lemna minor*) in water contaminated with hydrocarbons, considering that the research is at the application level, experimental, prospective, longitudinal and analytical.

For the purposes of the research, the methodology used focused on the evaluation of the data collected, before and after the intervention through laboratory analysis, to determine whether or not duckweed (*Lemna minor*) achieved a significant phytoremediation effect in water contaminated with Diesel B5 S-50. Thus, six (06) experimental units (UE₀, UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ and UE₅) where 2 L of natural water was added for each one and later injected with 0.2 mL of Diesel B5 S-50, to the supply oxygen (4 L/s) and achieve emulsion between them. After this, the first sample (UE₀) was collected and sent to the laboratory for TPH analysis, resulting in 39.48 mg/L of TPH. After the fourteen (14) days of treatment, samples were collected from the other experimental units (UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ and UE₅) for analysis, resulting in the concentrations of TPH for UE₁ at 1.58 mg/L, UE₂ at 0.52 mg/L, UE₃ at 2.62 mg/L, UE₄ at 1.48 mg/L and UE₅ at 0.80 mg/L. Considering these results and that, the natural water with which the research was done is considered as Category 4 "conservation of the aquatic environment" and, in addition, according to the Environmental Quality Standards for Water, the water resource quality standard for TPH is 0.5 mg/L, the research was able to significantly reduce the concentration of TPH to the point of being close to the ECA.

Therefore, the research concludes that duckweed (*Lemna minor*) has a significant phytoremediation effect in Waters contaminated with hydrocarbons.

Keywords: Hydrocarbon, diesel, phytoremediation, duckweed, ECA.

INTRODUCCIÓN

La corrupción de los cuerpos de agua superficiales supone una variación significativa de sus características y propiedades fisicoquímicas intrínsecas. Sin embargo, al no recibir un proceso de tratamiento adecuado, el potencial de daño se magnifica, debido a que la presencia de determinados agentes contaminantes podría alterar las características y propiedades físicas, químicas y biológicas del recurso hídrico; la cual también podría repercutir en otros ecosistemas. De esto, un ejemplo son los derrames de combustibles fósiles, como por ejemplo el petróleo en estado crudo que, si bien en su mayor composición es insoluble, presenta un mínimo fragmento soluble al que se le conoce como fracción acumulada de petróleo (FAP). Componente más tóxico del crudo el cual se incorpora en el agua después de un derrame de petróleo, por lo que los organismos acuáticos están más expuestos a este componente.

En relación con ello, se ha venido planteando y evaluando diferentes alternativas para el tratamiento de aguas contaminadas por hidrocarburos. No obstante, estas alternativas implican relativos altos costos de inversión y operación. Por eso, surgió la presente investigación intitulada efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos, con el objetivo de evaluar su eficacia y plantear su uso como alternativa de solución económica, posible y asequible.

Con la fitorremediación de las aguas contaminadas con hidrocarburos haciendo uso de la lenteja de agua (*Lemna minor*), se espera que el impacto por la contaminación con este agente antrópico sea mínimo y con ello no se afecten las características y propiedades físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua, y por ende minimizar el impacto ambiental negativo.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La corrupción de la calidad de las aguas naturales cada vez es más frecuente, indistintamente del agente (físico, químico o microbiológico) que sea introducido en estos, supone una variación significativa de sus características y propiedades fisicoquímicas intrínsecas. La fitorremediación de es un proceso en el cual se usan especies vegetales para expeler los agentes contaminantes de las aguas y, dependiendo del tipo de especie vegetal utilizada, se pueden obtener mejores resultados en la cualidad del agua tratada.

Los derrames de combustibles fósiles constituyen un significativo impacto ambiental negativo, independientemente del componente natural donde se suscite este tipo de eventos. El petróleo crudo es resultante de una mezcla compleja de productos, esencialmente de hidrocarburos, donde el carbono está en un rango de 83 y 87 % y el hidrogeno, entre 10 y 14 % (Hsu y Robinson 2019, citado en Caja 2020). Como resultado de estos sucesos, el agua contaminada se conduce a través de los cauces naturales y se diseminan hacia diferentes fuentes que sirven para abastecerse de agua para consumo humano, animal y de riego.

El petróleo en estado crudo, si bien en su mayor composición es insoluble, presenta un mínimo fragmento soluble al que se le conoce como fracción acumulada de petróleo (FAP). El componente más nocivo del crudo, que se disuelve en el agua tras un derrame de petróleo, exponiendo a los organismos acuáticos en mayor medida en comparación con otros elementos del crudo (Abbriano et al. 2011, Wilson y Ralph 2008, Wang et al. 2018, citado en Caja 2020). La FAP consta de componentes alifáticos, nafténicos, aromáticos, como benceno, tolueno (presente en mayor proporción que el benceno), etilbenceno, xileno y fenoles (Wilson y Ralph 2008, Salaberria et al. 2014); los hidrocarburos aromáticos policíclicos de mayor peso molecular poseen un coeficiente de reparto más alto, lo que hace que se encuentren

únicamente en concentraciones muy bajas o en trazas. (Neff et al. 2000, citado en Caja 2020).

Desde la perspectiva global, se han planteado y evaluado diferentes alternativas para el tratamiento de aguas contaminadas por hidrocarburos. Sin embargo, el uso de las alternativas fisicoquímicas, donde se emplea carbón activado, microorganismos, sustancias químicas, aire y otros, implica costos relativamente elevados tanto de inversión como de operación (Sursula et al. 2002, citado en Cubillos, 2011).

En este contexto, se utilizan hoy en día varias especies de organismos acuáticos conocidas como bioindicadores para evaluar el nivel de contaminación del agua y los efectos perjudiciales que los contaminantes infligen al medio ambiente (Kern et al. 2015, citado en Caja 2020). La lenteja de agua *Lemna minor* es uno de los bioindicadores empleados para identificar los efectos tóxicos que los contaminantes producen en los cuerpos de agua (Griff 1851, citado en Caja 2020). Esta planta es una macrófita vascular, angiosperma, monocotiledónea y flotante, con una amplia distribución en aguas dulces, desde regiones tropicales hasta zonas templadas. (Baird y Bridgewater 2017, citado en Caja 2020).

La problemática por derrames accidentales y premeditados de hidrocarburos en aguas naturales, aunque se hayan diseñado estrategias de contención y de mitigación, resultan finalmente en un impacto negativo irreversible para el componente natural y de los organismos que habitan en este. Lo que denota menester de investigar en el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos, empleando soluciones económicas, posibles y asequibles. Por lo que esta investigación propone estimar el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en la depuración de aguas con hidrocarburos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cómo influye el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50)?

¿Cuál es el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50) en la fracción de C 8 – C 40?

¿En qué medida varía el efecto fitorremediador antes y después de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50)?

1.3 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar cómo influye el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50).

Determinar cuál es el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50) en la fracción de C 8 – C 40.

Comparar el efecto fitorremediador antes y después de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50).

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La demanda de los combustibles fósiles es cada vez más notoria, pueden usarse para actividades de transporte (terrestre, aéreo y marítimo), industria (fábricas) y para generar energía (electricidad).

Los derrames de hidrocarburos, tanto accidentales como intencionales, junto con el vertido de aguas contaminadas con combustibles, representan un peligro inminente a nivel nacional. Debido a esto, estos contaminantes dañan la capa superior de la Tierra y los cuerpos de agua directamente o por la escorrentía, y también pueden filtrarse en reservas de agua subterráneas, cambiando las propiedades del agua

En el Perú, uno de los mayores desastres por este tipo de sucesos, es la ocurrida el 15 de enero del año 2022, cuando un buque descargaba crudo en uno de los terminales de la refinería La Pampilla, de dominio de la compañía Repsol. El suceso durante esta actividad resulto en el derrame de 11,900 barriles de petróleo en el océano, matando decenas de especies marinas y a aves que solían aterrizar en las playas para alimentarse; además de pingüinos de Humboldt, pelícanos, zarcillos, piqueros y golondrinas afectados. Así también, la contaminación en islas consideradas como áreas naturales protegidas (Bazo, 2022).

Por otro, considerando la limitada información respecto al uso de especies vegetales acuáticas en la depuración de aguas con hidrocarburos, este estudio surge como disyuntiva para ampliar los conocimientos sobre la aplicabilidad de especies fitorremediadoras en el tratamiento de aguas contaminadas por hidrocarburos.

Por consiguiente, el presente trabajo de investigación se realizó con la finalidad de evaluar el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos, y así plantear una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos, de tal manera que no se afecten las características y propiedades físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua, y así minimizar el impacto ambiental negativo.

1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones estuvieron relacionadas con la poca información sobre la aplicabilidad de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. A ello se adiciona que, para los fines de esta

investigación se requirió un manejo y uso cauteloso del hidrocarburo para evitar una contaminación difusa.

Por otro lado, la adquisición de los materiales y el análisis de las muestras resultaron en un costo relativamente significativo. No obstante, resultó asequible en contraste con su finalidad.

1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1 VIABILIDAD ECONÓMICA

La facilidad del investigador para la ejecución del trabajo de investigación en todas sus etapas (campo y gabinete), resultó viable ya que se contó con los recursos económicos necesarios.

1.7.2 VIABILIDAD TÉCNICA

Fue asequible ya que se contó con información sobre la aplicabilidad de la fitorremediación con especies vegetales acuáticas.

1.7.3 VIABILIDAD AMBIENTAL

La disponibilidad de la lenteja de agua (*Lemna minor*), su fácil adaptabilidad a los climas entre 10°C y 30°C y su alta tasa de reproducción, significó una alternativa para su uso en la depuración de aguas con hidrocarburos.

1.7.4 VIABILIDAD SOCIAL

Fue viable ya que el recurso hídrico se obtuvo directamente del cauce natural. Lo que significó que no se irrumpió en propiedad privada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Caisachana y Muñoz (2020). Evaluación de un proceso de fitorremediación mediante lenteja de agua (*Lemna minor*) para agua residual proveniente de una empresa azucarera. Universidad Agraria del Ecuador, Ecuador, tuvieron como objetivo implementar un método de limpieza a base de plantas para rehabilitar la vía fluvial del río Chimbo, afectado por las descargas de desechos de una fábrica de azúcar, empleando lemna menor (duckwe acuático para esto, factores físicos como la nubosidad, el calor, el flujo eléctrico y los minerales disueltos se verificaron, además del nivel de acidez en el nivel químico. Se aplicaron tres métodos, con 31.4 Gramas de Lemna Minor en las primeras, 44. 62.9 gramos en el tercero. Los **resultados** obtenidos incluyen un cambio en el pH de 7,46 a 7,73, un aumento en la temperatura de 18 °C a 24,2 °C, una reducción de la turbidez de 222 NTU a 3,73 NTU, un incremento en la conductividad de 17,48 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 308 $\mu\text{s}/\text{cm}$, y una ligera disminución de los sólidos disueltos totales de 151 mg/L a 146 mg/L. El segundo tratamiento mostró el mejor desempeño al mantenerse dentro de los límites permisibles. Un descubrimiento importante de esta investigación fue el incremento de la conductividad eléctrica del agua como resultado del proceso de fitorremediación. Por ello, se sugiere una gestión apropiada de las aguas del río Chimbo para garantizar su aprovechamiento en actividades agrícolas

Malaver (2013). Evaluación de un humedal artificial de flujo superficial empleando lenteja de agua (*Lemna minor*) para el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria de curtiembres. Universidad Libre. Colombia. Este estudio emplea una corriente de agua con lentejas adicionales para limpiar las aguas

residuales del sector de bronceado de cuero. Diversas investigaciones han demostrado la capacidad de esta planta para acumular materia orgánica, nitrógeno y fósforo, lo que ha impulsado su uso en la remediación de aguas contaminadas con cromo trivalente.

Este metal, que no es esencial, se encuentra en grandes cantidades en los efluentes. Se llevó a cabo una evaluación de un sistema de humedales de flujo superficial diseñado para tratar aguas residuales contaminadas con materia orgánica y cromo (III). El sistema consistió en cuatro humedales con igual capacidad, diseñados para un tiempo de retención hidráulica de 18 horas por etapa. Cada uno fue acondicionado con 300 gramos de lenteja de agua (peso húmedo) y 4300 gramos de grava. Para validar el funcionamiento del sistema, se construyó un humedal de control sin lenteja de agua, manteniendo el resto de las condiciones similares a las de los humedales con material vegetal. Los **resultados** del estudio indican que tanto el humedal de control como el que incluía *Lemna* fueron efectivos en la eliminación de materia orgánica y cromo (III). Sin embargo, el humedal con lenteja de agua mostró una mayor eficiencia en la remoción de estos contaminantes en comparación con el humedal testigo. La temperatura del agua en el sistema estuvo principalmente influenciada por las condiciones ambientales. Debido al tiempo de retención en cada etapa, ambos humedales (control y con vegetación) mostraron una alta capacidad para retener sólidos, siendo más efectiva en el humedal con *Lemna*. Asimismo, la eliminación de DQO, nitrógeno orgánico total y fósforo total fue superior en el humedal con lenteja de agua. En cuanto a la remoción de cromo, la reducción de Cr^{3+} fue más significativa en el humedal con *Lemna* que en el humedal testigo. El estudio mostró que el humedal con *Lemna* minor logró una impresionante remoción del 97,11 % para la DQO y del 99,91 % para el cromo. Estos resultados respaldan la efectividad de la lenteja de agua en la captura de contaminantes en los efluentes de la industria de curtiembre en Bogotá D.C., destacándose como una opción eficiente, accesible y fácil de implementar para el tratamiento de aguas residuales.

Suárez (2021). Fitorremediación: una alternativa para reducir la contaminación por hidrocarburos de petróleo en Ecuador. Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador, estudio que tuvo como **objetivo** sintetizar los resultados de las investigaciones se evaluó la fitorremediación como una alternativa para disminuir la contaminación por hidrocarburos, utilizando la especie *Eichhornia crassipes*, una planta acuática micrófita. El estudio se llevó a cabo en 130 kg de suelo provenientes de la cuenca baja del río Guayas, extraídos de una finca dedicada al cultivo de caña de azúcar. Los resultados indicaron que, aunque la mayor acumulación de metales pesados se concentró en la radícula, las plantas alcanzaron alturas superiores a 20 cm. No se observaron diferencias significativas en el pH del sustrato entre el inicio (6.41) y el final (6.1) del experimento, y al concluir la octava semana se registró la presencia de inflorescencias. La especie demostró un buen desempeño en suelos contaminados con cadmio mediante fitorremediación, logrando una reducción del 23.63% del contaminante con una concentración inicial de 8 mg/kg de Cd.

Saffon (2015). Remoción de hidrocarburos en aguas usando tecnologías de fitorremediación. Universidad Católica de Manizales, Caldas, Colombia, las investigaciones y aplicaciones de la fitorremediación en el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos se han llevado a cabo desde hace más de 15 años. Este estudio tuvo el **objetivo** de evaluar la posibilidad de remover hidrocarburos presentes en agua residual sintética, por medio de tecnologías de fitorremediación. Para lo cual se usó el **sistema vetiver, basado en la utilización de pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)**, construido con un tapiz flotante de vegetación el cual está formado en la superficie de agua.

El proceso de remoción de hidrocarburos alcanzó su mayor eficiencia en la concentración C1, con un 87% de eliminación, lo que indica que una menor concentración inicial de hidrocarburos favorece una mayor remoción.

Esta tendencia se confirma con la muestra C2, que presentó una eliminación del 73%. La fitorremediación, especialmente a través del sistema con vetiver, mostró los mejores resultados cuando el agua contenía una menor cantidad de hidrocarburos.

Cubillos (2011). Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, tuvo como **objetivo** evaluar la viabilidad de la fitorremediación como una alternativa tecnológica para tratar aguas contaminadas por hidrocarburos del petróleo. Se adaptó a las características específicas del departamento de Risaralda, con un enfoque en su uso para gestionar las descargas líquidas de las estaciones de servicio de la región. Para llevar a cabo esto, se instalaron tres humedales piloto con *Phragmites* sp. en las instalaciones de la universidad, diseñados para comparar su eficacia en la reducción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP), la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) y el nitrógeno total bajo diferentes condiciones operativas. Se **evaluaron** dos humedales de flujo subsuperficial: uno con vegetación y otro sin ella, además de un humedal flotante. Los sistemas que contaban con sustrato terroso demostraron una notable capacidad para eliminar hidrocarburos, logrando más del 50% de eficiencia incluso en aguas con altas concentraciones de estos compuestos. Esta eliminación se atribuyó principalmente a la volatilización, la adsorción y la retención en el medio filtrante, así como a la actividad microbiológica presente en el humedal. Por otro lado, el sistema que carecía de sustrato y plantas no mostró resistencia a los hidrocarburos. En lo que respecta a la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5), el humedal con sustrato y vegetación (HSSP) resultó ser el más efectivo, alcanzando más del 92% de remoción ($p < 0,05$). Finalmente, la eliminación de nitrógeno no mostró diferencias significativas entre los humedales con medio filtrante, y la presencia de hidrocarburos no afectó su capacidad de remoción.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

Caja (2020). Evaluación del riesgo ambiental acuático de petróleo crudo en: *Lemna minor* (GRIFF), *Daphnia magna* (STRAUS) y *Danio rerio* (HAMILTON-BUCHANAN. Universidad Científica del Sur, Lima, Perú, el **objetivo** del estudio fue evaluar el riesgo ambiental acuático de petróleo crudo mediante **bioensayos de toxicidad letal y subletal en *Lemna minor*, *Daphnia magna* y *Danio rerio***. La investigación examinó la toxicidad de los hidrocarburos totales presentes en la fracción acomodada del petróleo, mediante el análisis de varios bioindicadores. Se midieron el peso seco y la clorosis en *Lemna minor*, la mortalidad e inmovilidad en *Daphnia magna* y la hipoactividad, el escape hacia el fondo y la hipoventilación en *Danio rerio*. En *L. minor*, se obtuvo una NOEC inferior a 0.4 mg/L y de 3.22 mg/L para clorosis y peso seco, respectivamente. Para *D. magna*, los valores de CE50-45h y CL50-45h fueron de 2.74 mg/L y 6.22 mg/L, respectivamente. En el bioensayo realizado con *D. rerio*, la hipoactividad presentó una NOEC de 14.28 mg/L y una LOEC de 28.61 mg/L tras 96 horas de exposición. En todos los parámetros analizados, el cociente de riesgo fue superior a 1, lo que indica la existencia de un riesgo ambiental para los ecosistemas acuáticos.

Alvarado (2018). Influencia del uso de Lemna Minor en el Tratamiento de la contaminación orgánica de los efluentes industriales de Cotexsur. Universidad de Huánuco. Perú. Esta investigación tuvo como propósito evaluar la eficacia del tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa **Cotexsur** mediante el uso de la planta acuática **Lemna minor**. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y diseño experimental. La muestra se obtuvo siguiendo criterios de conveniencia y los protocolos establecidos según los análisis y el tratamiento propuesto. Algunas macrófitas tienen la capacidad de absorber o retener diferentes contaminantes, y se ha comprobado que Lemna minor tiene estas habilidades. Se llevaron a

cabo tres ensayos con cantidades de Lemna minor de 100, 200 y 300 g, manteniendo un tiempo de retención fijo de 10 días y realizando muestreos en los días 3, 6 y 10, siempre utilizando el mismo volumen de efluente. Los resultados mostraron que, respecto a los parámetros de carga orgánica, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) presentó una reducción del 61 %, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) disminuyó en un 68 %, y los sólidos suspendidos totales se redujeron en un 61 %. El análisis de los resultados obtenidos y el procesamiento de los datos indicaron que, en relación con el objetivo general y en concordancia con la hipótesis planteada, se **concluyó** que el uso de Lemna minor es muy efectivo para reducir la carga orgánica en los efluentes industriales de Cotexsur, Lurín (2017); el tratamiento más eficaz utilizó 100 g de Lemna minor. Al comparar los tres esquemas, se encontraron diferencias que son estadísticamente significativas. El análisis ANOVA de dos factores reveló estas variaciones, las cuales fueron confirmadas por la prueba de Tukey HSD con un nivel de significancia del 5%.

2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES

Por lo expuesto de forma preliminar en las limitaciones de la investigación, no se pudo hallar información a nivel local que esté relacionada con el tipo de investigación que pretendo realizar. Solo se consiguió información sobre la aplicación de especies vegetales acuáticas en la depuración de aguas residuales.

Por consiguiente, podría decirse que esta investigación es eminente en su categoría y por ende servirá de antecedente para futuros estudios de similar aplicación.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 SISTEMA DE PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES

La acuicultura, o conjunto de plantas acuáticas flotantes, es una modalidad de los humedales artificiales donde el agua está expuesta al entorno y es la principal fuente de oxígeno para la aireación. En este contexto, se incorpora el uso de plantas acuáticas flotantes como *Eichhornia crassipes* y *Lemna* sp, el objetivo es remover algunos componentes del agua por medio de las raíces para formar un buen sustrato encargado del tratamiento. No obstante, uno de los inconvenientes de este tipo de sistemas es el desarrollo de larvas e insectos (León y Lucero, 2009).

Según Celis et al. (2005) los sistemas que emplean plantas acuáticas como *Eichhornia crassipes* en el tratamiento del agua están diseñados para proporcionar niveles de tratamiento secundario. Estos sistemas han sido empleados como medios para la producción de proteínas a partir de la abundante biomasa generada. En los últimos años, el uso de estanques con plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales ha ganado gran interés debido a su capacidad de depuración. Diversos de estos sistemas han demostrado ser eficaces no solo en la eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión, sino también en la reducción de nutrientes, sales disueltas, metales pesados y patógenos (como se citó en García, 2012).

2.2.2 CLASES DE PLANTAS ACUÁTICAS

Estas plantas requieren una cantidad considerable de agua en sus raíces para su supervivencia, desarrollándose en entornos altamente húmedos y completamente sumergidos. Sus necesidades nutricionales son similares a las de las plantas terrestres. Se pueden categorizar en tres tipos: flotantes, sumergidas y emergentes. (León y Lucero, 2009, como se citó en Caicedo, 1995).

2.2.2.1 Flotantes.

Estos son los que tienen partes sintéticas en la superficie y sus raíces bajan por la columna de agua. Los rizomas no solo se utilizan para absorber los nutrientes del agua, sino que también valen como sustancia para las bacterias y como método adsorbente para los sólidos en suspensión. Bloquean la incursión de la luz, impidiendo el crecimiento de algas en el fondo. Entre las plantas flotantes se encuentran el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*); helechos de agua (León y Lucero, 2009).

2.2.2.2 Sumergidas.

Son especies que no emergen en la superficie del agua y poseen rizomas que penden en el agua o se adhieren al fondo. Suministran principalmente oxígeno al agua y nunca se encuentran en áreas donde hay presencia de fitoplancton, ya que bloquean la entrada de luz y las plantas sumergidas detendrán la fotosíntesis (León y Lucero, 2009).

2.2.2.3 Emergentes.

Estas plantas echan raíces hasta el fondo y sus hojas se elevan sobre el agua, entre las más comunes en Sudamérica podemos encontrar el carrizo (*Phragmites* sp), el carrizo (*Juncus* sp) y la espadaña (*Typha* sp); este conjunto se usa más comúnmente en humedales artificiales, donde se agregan medios de apoyo para el enraizamiento (León y Lucero 2009).

2.2.3 HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son un sistema que emplea macrófitas, es decir, plantas visibles sin necesidad de instrumentos ópticos, en lugar de micrófitas como las microalgas. Esto se debe a que estos sistemas no son lagunas naturales, sino espacios diseñados con vegetación específica para el tratamiento del agua. (Rodríguez, 2017).

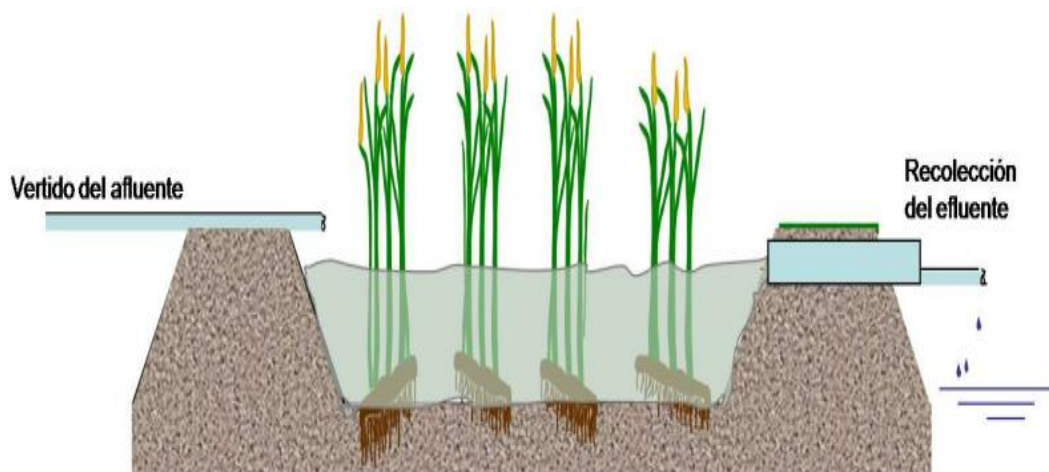
2.2.3.1 Humedales Artificiales de Flujo Superficial

En los humedales artificiales con escorrentía superficial, el agua recorre en placa libre entre las plantas que están naturalmente expuestas al sol y al ambiente. La profundidad de este nivel freático está entre los 30 y 40 cm (Rodríguez, 2017, como se citó en García y Corzo, 2008).

El manto más superficial es la capa aeróbica y las capas más hondas suelen ser anóxicas si no se dispone de aireación por medios subalternos, lo que facilita enormemente la supresión de nitrógeno a través de procesos de nitrificación y desnitrificación. Se sabe que las reacciones biológicas son impulsadas por microorganismos que se adhieren a las partes sumergidas de las plantas, a los restos vegetales y a la zona bentónica del sustrato. Además, las hojas y tallos en descomposición que están sumergidos se fragmentan y se convierten en un soporte ideal para el desarrollo de biopelículas microbianas (Rodríguez, 2017).

Figura 1

Humedal de Flujo superficial



Nota. Adaptado de Guía práctica de diseño, construcción y explotación de humedales de flujo subsuperficial (p. 2), García y Corso, 2008. Universidad Politécnica de Catalunya.

2.2.3.2 *Humedales de Flujo Subsuperficial.*

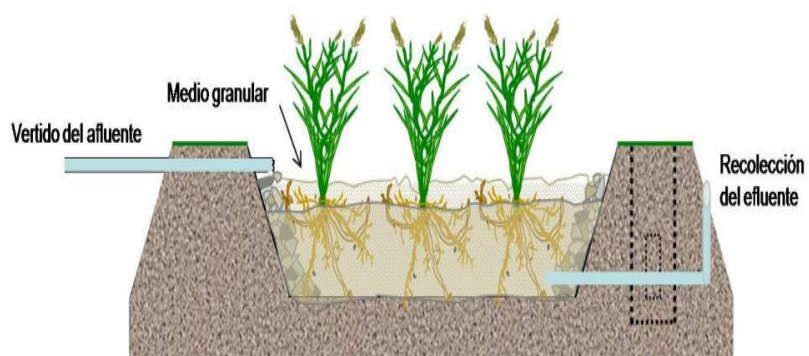
En los humedales artificiales con flujo subterráneo, el agua circula bajo la superficie sin entrar en contacto directo con la atmósfera. Su desplazamiento ocurre a través del medio filtrante, interactuando directamente con las raíces y rizomas de las plantas. En este tipo de sistema, la profundidad del agua varía entre 30 y 90 cm (García y Corzo, 2008). En este tipo de humedales artificiales, la biopelícula que se desarrolla y se adhiere al sustrato, las raíces y los rizomas, desempeña un papel crucial en la purificación del agua, creciendo principalmente en condiciones anóxicas (Rodríguez, 2017).

Los sistemas de flujo subterráneo poseen una mejor suficiencia de manejo que los sistemas de flujo superficial, es decir, demandan menos área de superficie para manejar una carga dada, ya que la permeabilidad del medio incrementa significativamente el área de superficie de contacto. Por otro lado, al permitir que el agua circule por debajo de la superficie, se reduce el riesgo de malos olores y la proliferación de mosquitos, además de prevenir los peligros que podrían surgir cuando el personal de mantenimiento entra en contacto con aguas residuales parcialmente tratadas (Rodríguez, 2017).

- a) **Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.** En estos sistemas, la nutrición se mantiene de manera continua, con el agua fluyendo horizontalmente a través de los sustratos, rizomas y raíces. Se distinguen por tener estructuras que permanecen sumergidas de forma permanente y que soportan cargas cercanas a 6 g de DBO₅ por m² al día (Rodríguez, 2017, como se citó en García y Corzo, 2008).

Figura 2

Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal

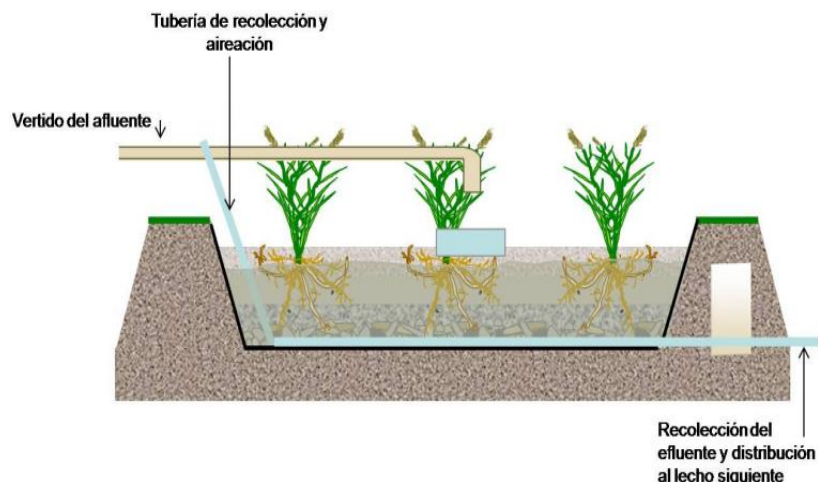


Nota. Adaptado de Guía práctica de diseño, construcción y explotación de humedales de flujo subsuperficial (p. 2), García y Corso, 2008. Universidad Politécnica de Catalunya.

- b) **Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.** Esta modificación de cenagales de flujo subterráneo se representa esencialmente por la circulación vertical del agua con aporte intermitente, de manera que no se inunda permanentemente. El flujo descendente de agua crea un reflujo que crea más oxígeno. Esto permite tratar volúmenes elevados de materia orgánica y llevar a cabo los procesos de nitrificación y desnitrificación. Estos humedales ofrecen una mayor capacidad de tratamiento que los de flujo horizontal, aunque presentan un mayor riesgo de obstrucción debido a la acumulación de material granular. (Rodríguez, 2017, citado en García y Corso, 2008). La siguiente figura muestra un diagrama de este tipo de sistema.

Figura 3

Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical



Nota. Adaptado de Guía práctica de diseño, construcción y explotación de humedales de flujo subsuperficial (p. 9), García y Corso, 2008. Universidad Politécnica de Catalunya.

- c) **Sistemas de Tratamiento Basados en Macrófitos de Hojas Emergentes.** Especialmente angiospermas en suelo anegado. Los miembros reproductivos son emergentes o están en el aire. El jacinto de agua y la lenteja de agua son las variedades más empleadas para este sistema. (Vargas, 2017, como se citó en Cricyt, 2007).

2.2.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO BASADOS EN MACRÓFITAS SUMERGIDAS

Estos contienen algunos helechos, e innumerables especies de musgos y espirulina, y muchas angiospermas. Se sitúan generalmente en la región fótica (donde llega la luz solar), no obstante, las angiospermas vasculares solo viven a profundidades de unos 10 m. órganos reproductivos en el aire, flotando o hundiéndose (Vargas, 2017, como se citó en Cricyt, 2007).

2.2.5 FITORREMEDIACIÓN

El concepto de fitorremediación surgió en la década de 1990 como resultado de estudios sobre humedales artificiales diseñados para la recuperación de entornos descompuestos con hidrocarburos y

la absorción de metales pesados por parte de plantas utilizadas en la agricultura (EPA, 2000; citado en Cubillos, 2011), se define como una alternativa tecnológica desarrollada y aplicada para la recuperación de entornos afectados por diversos contaminantes. Su fundamento radica en el empleo de plantas y su interacción con los microorganismos presentes en la rizosfera, con el propósito de eliminar, transformar, retener o descomponer los contaminantes presentes en suelos, sedimentos, así como en aguas superficiales y subterráneas. (Susarla et al., 2002, citado en Cubillos; 2011); puede utilizarse para la eliminación de metales, pesticidas, solventes, explosivos, aceites y hidrocarburos derivados del petróleo, así como compuestos clorados, lixiviados y sustancias volátiles presentes en el aire (EPA, 1999; Interstate Technology and Regulatory Cooperation, 2001; Newman and Reynolds, 2004; citado en Cubillos, 2011).

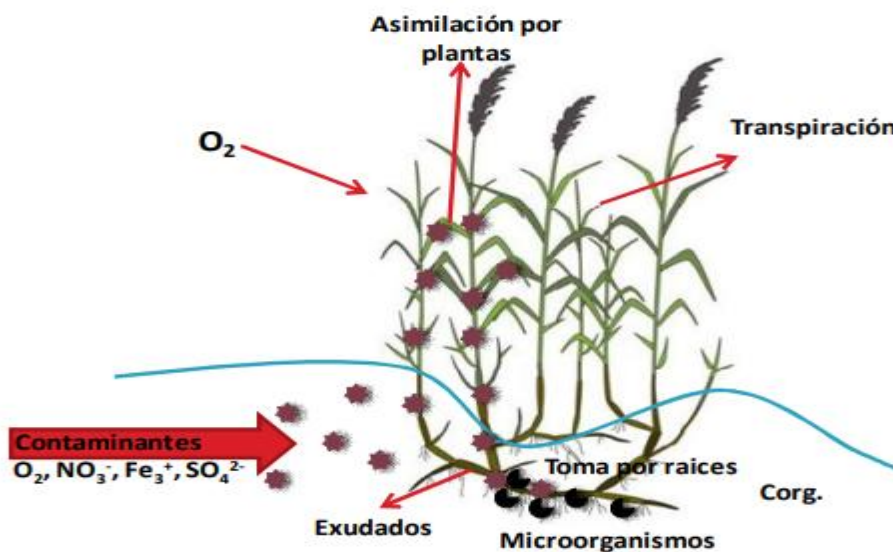
2.2.5.1 Fitorremediación de Hidrocarburos.

La fitorremediación es una opción innovadora y económica, que ofrece beneficios estéticos, contribuye a la captura de gases de efecto invernadero, opera únicamente con energía solar y puede aplicarse en diversos niveles de contaminación (Schnoor, 1997; Guendy, 2008; citado en Cubillos, 2011).

La fitorremediación puede aplicarse tanto in situ como ex situ y, dependiendo del mecanismo que tenga lugar dentro del sistema, ya sea en el suelo, las plantas o los microorganismos, pueden predominar los siguientes procesos:

Figura 4

Simbiosis en sistemas de fitorremediación



Nota. La figura denota la simbiosis de una planta acuática con los contaminantes presentes en el agua (Cubillos, 2011).

2.2.6 LAS FITOTECNOLOGÍAS DE FITORREMEDIACIÓN

En la investigación realizada por (Delgadillo López, González Ramírez, Prieto García, Villagómez Ibarra, & Acevedo Sandoval, 2011) define las fitotecnologías se fundamentan en los procesos fisiológicos esenciales que ocurren en las plantas y en los microorganismos que las acompañan, como la transpiración, la fotosíntesis, el metabolismo y la absorción de nutrientes.

Los principales mecanismos para la eliminación de hidrocarburos en aguas y suelos contaminados incluyen la degradación, la acumulación y la volatilización de estos compuestos (Frick et al., 199; citado en Cubillos, 2011).

Tabla 1*Mecanismos de fitorremediación*

Proceso	Planta	Contaminantes
Fitoextracción	Pastos, plantas freáticas (sauces, álamos)	Metales pesados, compuestos hidrofóbicos
Rizodegradación	Pastos, plantas freáticas (sauces, álamos), plantas acuáticas emergentes y subemergentes	Compuestos orgánicos biodegradables (BTEX, HTP, PAHs, PCBs, pesticidas), metales, compuestos hidrofóbicos, radionucleótidos
Fitoestabilización	Pastos, plantas freáticas (sauces, álamos)	Metales pesados, compuestos hidrofóbicos
Fitodegradación	Pastos, plantas freáticas (sauces, álamos), leguminosas (alfalfa, trébol)	Herbicidas, compuestos alifáticos clorinados, compuestos aromáticos, residuos de amonio y nutrientes
Fitovolatilización	Plantas de humedales (juncos, cañas, espadañas)	Metales (Se, As, Hg), compuestos orgánicos volátiles (BTEX, MTBE)

Nota. La tabla muestra los procesos y las plantas utilizadas para la fitorremediación de determinados contaminantes. Dietz and Schnoor, 2001; citado en Cubillos, 2011.

2.2.6.1 Fitoextracción.

Este proceso consiste en la impregnación del contaminante por las raíces de la planta, aprovechando la capacidad de ciertas especies para depositar compuestos en sus tejidos. De este modo, la planta capta y concentra la sustancia contaminante en sus partes aprovechables, como hojas y tallos, especialmente cuando dicho compuesto no se degrada de manera rápida o completa (Carpena y Bernal, 2007; citado en Cubillos, 2011).

La fitoextracción es una técnica muy efectiva para eliminar compuestos como BTEX, solventes clorados e hidrocarburos alifáticos de cadena corta. Esto se debe a que estos compuestos tienen un Log Kow que varía entre 1 y 3,5 (Schnoor, 1997; citado en Cubillos, 2011).

2.2.6.2 Rizodegradación.

La rizodegradación, también llamada fitoestimulación, es el proceso mediante el cual los contaminantes son degradados en la zona radicular de las plantas, gracias a la actividad de los microorganismos presentes en la rizosfera. Esta actividad se ve

estimulada por la acción de proteínas y enzimas, así como por la liberación de exudados ricos en carbono, energía, nutrientes, azúcares, aminoácidos y otros compuestos que crean un ambiente óptimo para el desarrollo microbiano (Van Deeps, 2006; citado en Cubillos, 2011).

Como sostiene Cubillos (2011) la rizodegradación podría ser el mecanismo más importante para la eliminación de los hidrocarburos derivados del diésel (PAHs), al ser hidrofóbicos y fácilmente retenidos en los suelos, reducen su biodisponibilidad para ser absorbidos por los macrófitos y degradados mediante fitodegradación. Esto favorece un mayor contacto con la zona radicular, donde se lleva a cabo su remoción

2.2.6.3 *Fitoestabilización.*

La fitoestabilización utiliza plantas para disminuir la cantidad de contaminantes disponibles en el medio ambiente, atrapándolos en el suelo y en el agua a través de sus raíces. Este mecanismo es especialmente útil para la retención de metales, ya que, en muchos casos, su inmovilización es preferible debido a la dificultad de su degradación. Este proceso aprovecha las modificaciones físico-químicas que las plantas inducen en el suelo, facilitando la precipitación de metales en la zona radicular, principalmente mediante la alteración del pH generado por la propia vegetación (Van Deeps, 2006; citado en Cubillos, 2011).

2.2.6.4 *Fitodegradación.*

También denominada fitotransformación, este proceso consiste en la conversión de compuestos contaminantes en moléculas más simples, que luego son incorporadas a los tejidos vegetales y contribuyen al desarrollo de la planta. Durante este mecanismo, las enzimas y proteínas de las plantas facilitan reacciones químicas que fragmentan las moléculas

contaminantes. La fitodegradación ocurre en tres etapas: conversión, conjugación e incorporación a la planta (almacenamiento en la vacuola o la pared celular), lo que permite su desintoxicación (Dietz y Schnoor, 2001; citado en Cubillos, 2011).

2.2.6.5 Fitovolatilización.

Para su desarrollo, las plantas requieren agua y compuestos orgánicos, por lo que absorben los contaminantes y los transportan hacia los tallos y hojas. A través de las estomas abiertas en las hojas, estos compuestos se evaporan y son liberados a la atmósfera en una forma modificada (USEPA, 1998; citado en Cubillos, 2011). La fitovolatilización es un proceso clave para deshacerse de compuestos hidrofóbicos y volátiles, como los bencenos y otros miembros del grupo BTEX. Este mecanismo es especialmente crucial en humedales de flujo subsuperficial, donde la volatilización directa se ve restringida por la escasa difusión de los contaminantes en la zona no saturada (Kadlec y Wallace, 2008; citado en Cubillos, 2011).

2.2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN

De acuerdo con la investigación realizada por (Agudelo et al., 2005)

2.2.7.1 Ventajas.

Los contaminantes absorbidos por las plantas pueden ser eliminados mediante la recolección de la biomasa, la cual posteriormente puede ser reciclada. Gracias a su capacidad para captar contaminantes, la fitorremediación se emplea en la descontaminación de diversos entornos afectados.

2.2.7.2 Desventajas.

El proceso de fitorremediación sigue el ciclo natural de las plantas, por lo que requiere un tiempo prolongado.

Su efectividad es mayor cuando los contaminantes se encuentran dentro del alcance del sistema radicular, lo que generalmente abarca de uno a dos metros de profundidad en el caso de las plantas herbáceas y entre tres y cinco metros para los árboles.

Algunas plantas pueden absorber metales tóxicos, lo que podría representar un riesgo para la cadena alimentaria.

Para que un método sea sostenible, debe ser tanto económicamente viable como ambientalmente adecuado. La fitorremediación aprovecha las capacidades naturales de las plantas y los ecosistemas que las sustentan para descontaminar diversas áreas, resultando más económica en comparación con los métodos tradicionales de remediación.

Además, requiere menos intervención humana y minimiza la alteración del entorno natural del sitio afectado.

2.2.8 EFICIENCIA DE FITORREMEDIACIÓN

En cuanto a los procesos de fitorremediación en cuerpos de agua, se han llevado a cabo numerosas investigaciones cuando los contaminantes principales son aguas residuales o metales pesados. Sin embargo, el número de estudios disminuye significativamente cuando se trata de aguas contaminadas con hidrocarburos. Esto puede deberse a la compleja composición de estas sustancias, ya que, en casos de derrames, su eliminación suele realizarse manualmente o mediante la aplicación de productos químicos, los cuales, aunque aparentemente más rápidos, en muchos casos resultan ser más tóxicos que los propios hidrocarburos (Velázquez, 2016).

2.2.8.1 Lenteja de Agua (*Lemna minor*).

Wetzel (1981), la *Lemna minor* se caracteriza por tener principalmente hojas flotantes con un bajo contenido de tejido lignificado. La rigidez y flotabilidad de sus hojas se conservan gracias a la turgencia de sus células vivas y al amplio desarrollo

del tejido lagunar en el mesófilo, donde en muchos casos más del 70% de su volumen está ocupado por aire. Su reproducción se lleva a cabo de manera vegetativa, lo que permite la formación de nuevas rosetas. Las macrófitas desempeñan un papel fundamental en el flujo de energía y en los ciclos de nutrientes dentro de los ecosistemas lacustres. A través de la fotosíntesis, capturan energía y la convierten en materia orgánica, al mismo tiempo que absorben nutrientes del agua, especialmente fósforo y nitrógeno. Además, su capacidad para captar nutrientes, alterar el entorno circundante o liberar sustancias con propiedades antibióticas les permite inhibir el desarrollo y reproducción de otros organismos, como algas microscópicas y ciertos grupos de bacterias.

El fósforo y ciertas formas de nitrógeno se consideran contaminantes cuando sus niveles en el agua son demasiado altos, ya que pueden provocar un crecimiento desmedido de fitoplancton y facilitar la aparición de patógenos. Por eso, es fundamental reducir sus concentraciones, y para lograrlo, se han puesto en marcha varios métodos de tratamiento, tanto químicos como biológicos.

Gutierrez (2010), menciona que las lentejas de agua están limitadas a hábitats protegidos, ubicándose en los márgenes de ríos de corriente lenta, especialmente en áreas resguardadas como la Bahía interior de Puno. También pueden encontrarse en zonas donde los totorales son muy densos. Bajo condiciones óptimas de resguardo, pueden formar una capa de varias láminas con un grosor de entre 0.5 y 1 cm.

Palacios (2011), sostiene que estos vegetales obtienen todos sus nutrientes directamente del lago. La mayoría de estos micrófitos habitan en cuerpos de agua con una alta concentración de sales disueltas y aguas residuales con un elevado contenido de nutrientes. A través de diversas

investigaciones, se les ha identificado como un indicador de contaminación y/o procesos de eutrofización en los ecosistemas acuáticos.

2.2.8.2 Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*).

Se distingue por ser una especie de gran productividad, aunque de naturaleza invasiva a nivel global, lo que dificulta su eliminación. No obstante, gracias a su notable capacidad para absorber contaminantes en cuerpos de agua, actualmente se emplea como planta principal en procesos de fitorremediación acuática (Rezania et al., 2015; Velázquez, 2016).

2.2.9 ASOCIACIONES EN LA FITORREMEDIACIÓN

Además de las bacterias, los hongos micorrícicos desempeñan un papel fundamental en el proceso de recuperación, ya que los tratamientos de fitorremediación que incluyen estas asociaciones resultan más eficaces en la eliminación de hidrocarburos y en la reducción de la toxicidad del suelo tratado (Joner et al., 2001; citado en Velázquez, 2016).

Por otro lado, se destaca que la simbiosis micorrícica aporta un beneficio adicional en la fitorremediación de petróleo, ya que favorece el desarrollo de una microflora bacteriana específica, lo que a su vez incrementa la eficiencia del proceso de fitorremediación (Peña-Castro et al., 2006; Velázquez, 2016).

2.2.10 NUTRIENTES EN LA FITORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS

En el proceso de biodegradación de suelos o aguas contaminadas con hidrocarburos, un incremento en la cantidad de carbono puede generar deficiencias de nitrógeno y fósforo. Esto se debe a su inmovilización por la actividad microbiana, así como a las necesidades de nutrientes que presentan los microorganismos y las plantas para su

desarrollo y eficacia en la eliminación de los contaminantes (Kirkpatrick et al., 2006; Guendy, 2008; citado en Velásquez, 2016).

La descomposición de los hidrocarburos y las modificaciones del nitrógeno durante la fitorremediación involucran diversos procesos microbianos, los cuales varían según las condiciones aerobias o anaerobias del suelo. Estos procesos pueden influir en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, ya sea incrementándola o reduciéndola (Mitsch y Gosselink, 1986; citado en Velásquez, 2016).

2.2.11 HUMEDALES CON AGUA CONTAMINADA POR HIDROCARBUROS

En Francia, en 1999, Salmon et al. llevaron a cabo un estudio utilizando dos humedales artificiales de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales con concentraciones de hidrocarburos entre 30 y 60 ppm. Uno de los humedales fue plantado con *Typha latifolia*, mientras que el otro, con *Lemna minor*, sirvió como control. Los resultados mostraron que el humedal con *Typha latifolia* logró una mayor eficiencia de remoción, alcanzando hasta un 90 % de eliminación del compuesto y reduciendo la concentración de efluentes a menos de 8 ppm. Además, se observó un crecimiento significativo de bacterias aerobias heterotróficas (10^6 bact/ml) y bacterias capaces de utilizar hidrocarburos como fuente de carbono (10^5 bact/ml), lo que evidenció la interacción entre las plantas y los microorganismos en el proceso de eliminación de hidrocarburos.

Desde un ángulo diferente, una investigación reveló que los humedales pueden ser una solución efectiva para eliminar cianuro e hidrocarburos de las aguas subterráneas. En este estudio, los autores destacaron que, utilizando humedales de flujo superficial con *Ceratophyllum demersum* y varias especies de *Potamogeton*, lograron eliminar el 67% de los compuestos orgánicos que se encuentran en la gasolina y el diésel (Gessner et al., 2005; citado en Velásquez, 2016).

Por otro lado, se ha estudiado el uso de especies vegetales específicas, como *Phragmites*, mediante la evaluación de los niveles de clorofila y humedad como indicadores de productividad y biomasa en un humedal de flujo subsuperficial a escala piloto. (Guendy, 2008; citado en Velázquez, 2016).

2.2.12 HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos son componentes fundamentales del petróleo, conformados exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno. Se clasifican en distintas familias químicas según su estructura, todas ellas sustentadas en la capacidad del carbono para formar cuatro enlaces (El refinado del Petróleo, 2004, p. 2).

Figura 5

Cadenas moleculares de carbono-carbono

Las cadenas moleculares carbono-carbono pueden ser:

- Unidos por enlace simple: $\begin{array}{c} | \quad | \\ -C - C- \\ | \quad | \end{array}$ (sufijo ANO)
- Unidos por enlace múltiple:
 - doble: $\begin{array}{c} \backslash \quad / \\ C = C \\ / \quad \backslash \end{array}$ (sufijo ENO)
 - o triple: $-C \equiv C-$ (sufijo INO)

Nota. La figura denota las cadenas moleculares de los hidrocarburos carbono – carbono. (El refinado del Petróleo, p. 2 (2004).

Estos enlaces dan lugar a insaturaciones. Una molécula puede contener varios enlaces dobles (denotados con el sufijo DIENO para dos enlaces dobles), y se consideran conjugados cuando dos enlaces múltiples están separados por un solo enlace (El refinado del Petróleo, 2004, p. 3).

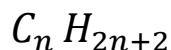
2.2.12.1 Hidrocarburos alifáticos saturados o parafinas

Estos compuestos están formados por una cadena de átomos de carbono, cada uno enlazado con entre 0 y 3 átomos de hidrógeno, a excepción del metano (CH₄), que es el más

simple. Cada átomo de carbono está siempre unido a otros cuatro átomos (carbono e hidrógeno), y su fórmula general es:

Fórmula 1

Fórmula general de los hidrocarburos alifáticos saturados o alcanos

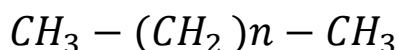


Nota. Lo que se muestra es la fórmula general de los hidrocarburos alifáticos saturados o también llamados alcanos. (El refino del Petróleo, p. 3 (2004).

Cuando presentan una estructura lineal, se conocen como parafinas normales o n-alcanos, cuya fórmula desarrollada es:

Fórmula 2

Fórmula desarrollada de los hidrocarburos de cadena recta

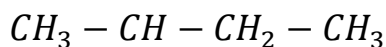


Nota. Aquí se expresa la fórmula de los hidrocarburos de cadena recta. (El refino del Petróleo, p. 3 (2004).

El punto de ebullición se eleva a medida que aumenta la cantidad de átomos de carbono en la molécula. En cadenas más cortas, la incorporación de un carbono adicional incrementa el punto de ebullición aproximadamente en 25°C, aunque este aumento se reduce conforme la cadena se alarga. Por otro lado, la densidad también crece con el peso molecular, registrándose valores de 0.626 kg/L para el pentano.

Fórmula 3

Fórmula del isopentano



Nota. fórmula general del isopentano. (El refino del Petróleo, p. 3 (2004).

Las isoparafinas presentan un punto de ebullición más bajo que las parafinas normales con igual número de átomos de carbono (El refino del Petróleo, 2004, p. 3 y 4).

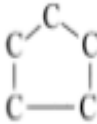
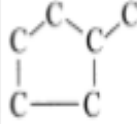
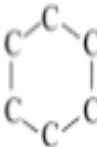
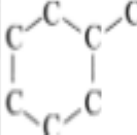
2.2.12.2 Hidrocarburos cíclicos saturados, cicloalcanos

En estos hidrocarburos, la estructura del esqueleto de carbono puede estar parcial o completamente ciclada. El anillo resultante puede tener una cantidad variable de átomos de carbono. Además, presentan puntos de ebullición y densidades mayores en comparación con los alcanos que poseen la misma cantidad de átomos de carbono.

En los petróleos crudos, los anillos más comunes suelen tener cinco o seis átomos de carbono. En estos anillos, cada átomo de hidrógeno puede ser reemplazado por una cadena parafínica, que puede ser lineal o ramificada, y que se conoce como grupo alquilo.

Figura 6

Fórmula de algunos hidrocarburos cíclicos saturados o cicloalcanos

	Fórmula empírica	Fórmula desarrollada	Peso molecular	Temperatura ebullición °C (1 atm)	d_4^{15} (líquido)
Ciclopentano	C ₅ H ₁₀		70,1	49,3	0,750
Metilciclopentano	C ₆ H ₁₂		84,2	80,7	0,753
Ciclohexano	C ₆ H ₁₂		84,2	80,7	0,783
Metilciclohexano	C ₇ H ₁₄		98,2	100,9	0,774

Nota. La figura muestra la fórmula general de hidrocarburos cíclicos saturados o también llamados cicloalcanos. (El refinado del Petróleo, p. 4 (2004).

En los cicloalcanos de cuatro y cinco anillos se hallan hidrocarburos que han mantenido parcialmente la estructura de

la materia orgánica original que dio lugar a la formación del petróleo, actuando como indicadores bioquímicos (El refino del Petróleo, 2004, p. 4 y 5).

2.2.12.3 *Hidrocarburos Aromáticos*

Se trata de hidrocarburos cíclicos con múltiples insaturaciones que se encuentran en gran cantidad en los crudos de petróleo. La inclusión de uno o más anillos con tres dobles enlaces conjugados en su estructura les otorga propiedades distintivas. Los compuestos más simples, como el benceno, tolueno y xilenos, son esenciales en la industria petroquímica y también contribuyen a mejorar el índice de octanaje en las gasolinas, mientras que sus homólogos de mayor peso molecular suelen ser perjudiciales. (El refino del Petróleo, 2004, p. 5).

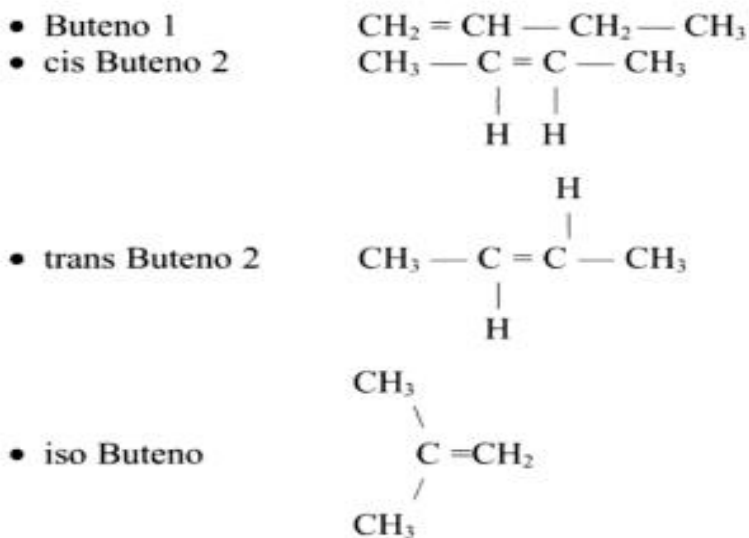
2.2.12.4 *Hidrocarburos alifáticos insaturados o alquenos*

En esta familia, algunos átomos de carbono en la molécula se conectan solo con tres átomos, lo que indica que hay uno o más enlaces dobles entre los carbonos.

La existencia de estos enlaces dobles genera una mayor complejidad en la formación de isómeros en comparación con las familias anteriores. Por ejemplo, los butenos C_4H_8 son:

Figura 7

Fórmula de algunos hidrocarburos alifáticos insaturados o alquenos



Nota. La figura expresa la fórmula de hidrocarburos alifáticos insaturados o también llamados alquenos. (El refino del Petróleo, p. 5 (2004).

Los términos CIS y TRANS se refieren, respectivamente, a la disposición de los dos átomos de hidrógeno: en el caso CIS, están en el mismo lado, mientras que en el TRANS, se encuentran en lados opuestos en relación con el plano que es perpendicular al doble enlace.

Las olefinas están prácticamente ausentes en el petróleo crudo y en los productos obtenidos por destilación directa; sin embargo, pueden encontrarse en los derivados del refino, especialmente en las fracciones resultantes de los procesos de conversión de fracciones pesadas, tanto térmicos como catalíticos. En este sentido, los primeros compuestos de esta familia, como el etileno, propileno y butenos, son materias primas fundamentales en la industria petroquímica (El refino del Petróleo, 2004, p. 5 y 6).

2.2.13 DIÉSEL

El diésel proveniente del petróleo está formado por un 75% de hidrocarburos saturados, principalmente parafinas, que incluyen

usoparafinas y cicloparafinas, y un 25% de hidrocarburos aromáticos, como naftalenos y alcalobencenos. La fórmula química general del diésel convencional es $C_{12}H_{16}$, con pequeñas cantidades de otros hidrocarburos cuyas fórmulas varían entre $C_{10}H_{22}$ y $C_{15}H_{22}$ (Department of Health and Human Services, Public Health Service 1995).

2.2.13.1 Diésel B5 S-50

De acuerdo con Petroperú (2024) es un combustible constituido por una mezcla de Diésel N°2 S-50 y 5% en volumen de Biodiésel (B100).

2.2.13.2 Diésel B5 – S50

Según Petroperú (2024) se trata de un combustible producido a partir de hidrocarburos mediante procesos de refinación, con un contenido de azufre que no supera las 50 ppm.

2.2.13.3 Biodiésel (B100)

Como expresa Petroperú (2024) se trata de un combustible diésel de origen renovable, obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales, y que presenta un contenido de azufre casi nulo.

2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.3.1 AGENTE

Cualquier agente biológico, químico o físico capaz de causar un efecto perjudicial. (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.2 AMBIENTE ACUÁTICO

Ecosistemas situados en masas de agua, como ríos, arroyos, lagos, lagunas, estuarios y canales. (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.3 BIOACUMULACIÓN

La cantidad de contaminantes que se acumula en el medio ambiente o en los tejidos de los organismos se debe a su absorción,

distribución interna y posterior eliminación a través de diferentes vías de exposición, como el aire, el agua, el suelo, los sedimentos y los alimentos.

La cantidad de contaminantes que se acumula en el medio ambiente o en los tejidos de los organismos se debe a su absorción, distribución interna y posterior eliminación a través de diferentes vías de exposición, como el aire, el agua, el suelo, los sedimentos y los alimentos (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.4 BIODISPONIBILIDAD

La toxicidad de las sustancias se define por su capacidad para infiltrarse en los organismos vivos a través de métodos como la inhalación, la ingestión o la absorción. Este proceso depende de varios factores, como las vías de exposición, las características fisiológicas del organismo que recibe la sustancia y las propiedades químicas del compuesto xenobiótico (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.5 CADENA DE CUSTODIA

Proceso documentado que describe la recolección, transporte, conservación y entrega de muestras al laboratorio para su análisis fisicoquímico, llevado a cabo por el personal encargado. (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.6 CONCENTRACIÓN

Cantidad de una sustancia disuelta o presente en una cantidad determinada de otra sustancia (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.7 CONTAMINANTE

Cualquier sustancia química que no forme parte de la composición natural del suelo, cuya concentración exceda los niveles normales y puede causar efectos adversos en la salud humana o en el medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2023).

2.3.8 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

La contaminación ambiental se refiere a la presencia de agentes físicos, químicos o biológicos, de manera individual o combinada, en el entorno en niveles, ubicaciones o formas que puedan representar un riesgo para la salud, la seguridad o el bienestar de la población. Asimismo, puede afectar negativamente la vida animal y vegetal, o interferir con el uso adecuado de propiedades, espacios recreativos y su disfrute (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.9 DERRAME

Cualquier liberación, derrame, fuga o vertido de hidrocarburos o líquidos peligrosos en el suelo, ya sea por una práctica incorrecta o de manera accidental (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.10 DERRAME DE PETRÓLEO

Los derrames de petróleo son catástrofes ambientales que pueden originarse por múltiples causas, afectando a varios sectores, siendo los más perjudicados la salud humana y animal (Vásquez, Ordoñez y Gonzáles, 2022).

2.3.11 ESTÁNDAR DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA)

El estándar que se utiliza para determinar la concentración o el nivel de ciertos elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos en el aire, el agua o el suelo, tiene en cuenta su papel como medio receptor. Es fundamental que estos niveles sean seguros y no representen un riesgo significativo para la salud humana ni para el medio ambiente. Dependiendo del parámetro que se esté evaluando, los valores pueden presentarse como límites máximos, mínimos o rangos aceptables (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.12 FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS F1

Conjunto de hidrocarburos cuya estructura molecular incluye entre cinco y diez átomos de carbono (C 5 a C 10). Los hidrocarburos de fracción ligera deben ser evaluados como contaminantes, ya que

incluyen mezclas de productos derivados del petróleo de origen incierto, así como petróleo crudo, gasavión, disolventes, gasolinas y nafta (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.13 FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS F2

Se trata de un grupo de hidrocarburos que tienen entre diez y veintiocho átomos de carbono (C10 a C28). Los hidrocarburos de fracción media deben considerarse contaminantes cuando aparecen en mezclas de productos derivados del petróleo de origen desconocido, como el petróleo crudo, diésel, gasóleo, turbosina, queroseno, creosota, gasavión, gasolvente, gasolinas y nafta (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.14 FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS F3

Se trata de un grupo de hidrocarburos cuyas moléculas tienen entre veintiocho y cuarenta átomos de carbono (C28 a C40). Los hidrocarburos de fracción pesada deben considerarse como contaminantes cuando se encuentran en mezclas de productos derivados del petróleo de origen incierto, como el petróleo crudo, el combustóleo, las parafinas, los petrolatos y los aceites de base petrolera (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.15 HIDROCARBUROS

De acuerdo con la Dirección Regional de Energía y Minas de Piura (2021) los hidrocarburos son compuestos orgánicos constituidos exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno. Su estructura molecular se basa en un esqueleto de átomos de carbono al que se enlazan los átomos de hidrógeno. Estos compuestos representan la base de la Química Orgánica y pueden presentarse en diferentes estados: en forma líquida de manera natural (petróleo), en estado líquido por condensación (condensados y líquidos del gas natural), en fase gaseosa (gas natural) y en estado sólido (como los hidratos de metano en forma de hielo).

2.3.16 HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA (F1)

De acuerdo con Ministerio del Ambiente (2016) es la mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan entre cinco y diez átomos de carbono (C 5 a C 10).

2.3.17 HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN MEDIA (F2)

Según Ministerio del Ambiente (2016) se trata de una combinación de hidrocarburos cuyas moléculas están compuestas por entre cinco y diez átomos de carbono.

2.3.18 HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN PESADA (F3)

El Ministerio del Ambiente (2016) Indica que se trata de una combinación de hidrocarburos cuyas moléculas están formadas por entre veintiocho y cuarenta átomos de carbono (C 28 a C 40).

2.3.19 MATRIZ AMBIENTAL

Componente de un ecosistema que puede verse afectado por un contaminante tras su liberación. Puede tratarse del agua (de un río, laguna, estero o mar), el sedimento, el suelo o el aire (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.20 MUESTRA SIMPLE

Como sustenta el Ministerio del Ambiente (2016) son las muestras recolectadas en un momento y lugar específicos se denominan muestras individuales. Estas muestras reflejan las condiciones particulares de una porción de la población en el instante en que fueron tomadas. Su uso es fundamental para el análisis de compuestos orgánicos volátiles (COV's), hidrocarburos y compuestos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX).

2.3.21 POBLACIÓN

Conjunto de individuos de la misma especie que habitan en una zona específica durante un periodo determinado (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.22 PUNTO DE MUESTREO

Ubicación específica en el suelo, ya sea un punto o una zona delimitada, donde se recolectan muestras, ya sean superficiales o a diferentes profundidades (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.23 RELACIÓN CAUSA-EFECTO

Conexión entre la cantidad de un agente que un organismo, población o ecosistema recibe, asimila o absorbe, y la reacción o alteración que esta exposición provoca en ellos. Términos relacionados: relación dosis-efecto, relación dosis-respuesta, relación concentración-efecto, evaluación del impacto (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.24 REMEDIACIÓN

Conjunto de acciones realizadas en un área contaminada con el objetivo de eliminar o reducir los contaminantes, asegurando la protección de la salud humana y la conservación de los ecosistemas (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.3.25 RÍOS

Se entiende por cuerpos naturales de agua lóticos aquellos que fluyen de manera continua en una sola dirección (Ministerio del Ambiente, 2017).

2.3.26 PETRÓLEO

El petróleo es un líquido aceitoso de tonalidad oscura o negra, con una densidad inferior a la del agua y un olor fuerte y característico. Su composición incluye una combinación de hidrocarburos junto con proporciones variables de azufre, oxígeno y nitrógeno (Foro de la Industria Nuclear de España, 2023).

2.4 HIPÓTESIS

2.4.1 HIPÓTESIS ALTERNA (H1)

La lenteja de agua (*Lemna minor*) tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

2.4.2 HIPÓTESIS NULA (H0)

La lenteja de agua (*Lemna minor*) no tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

2.5 VARIABLES

2.5.1 VARIABLE DE CALIBRACIÓN

Lenteja de Agua (*Lemna minor*).

2.5.2 VARIABLE EVALUATIVA

Aguas contaminadas con hidrocarburos.

2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

TÍTULO: EFECTO FITORREMEDIADOR DE LA LENTEJA DE AGUA (LEMNA MINOR) EN AGUAS CONTAMINADAS CON HIDROCARBUROS.

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variable de calibración	Indicadores	Valor final	Tipo de variable
Lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>)	<i>Fitorremediación</i>	Depuración de Aguas	Nominal monotómica
Variable evaluativa	Indicadores	Valor final	Tipo de variable
Aguas contaminadas con hidrocarburos	Según el D.S. N° 004-2017-MINAM: Parámetros orgánicos Hidrocarburos Totales de Petróleo (C ₈ – C ₄₀)	0.5 mg/L	Numérica continua

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Con intervención, ya que se trata de una investigación de tipo experimental. Esto se debe a que el estudio implica modificar una variable específica (Supo y Zacarías, 2020).

Según la planificación de las mediciones de la variable de estudio: es prospectivo, dado que los datos serán recolectados a partir de mediciones futuras realizadas mediante análisis de laboratorio. Los estudios prospectivos se caracterizan por planificar sus mediciones anticipadamente y controlar posibles sesgos en el proceso de recolección de datos (Supo y Zacarías, 2020).

Según el número de variables: es un estudio analítico, ya que involucra el análisis de dos variables. Este tipo de estudio se enfoca en establecer relaciones entre variables, y, por lo tanto, considera dos o más elementos sujetos a análisis estadístico, como se indica en el planteamiento (Supo y Zacarías, 2020).

Se clasifica como longitudinal según el número de mediciones de variables, porque se realizarán al menos dos mediciones de las variables. Los estudios longitudinales se caracterizan por evaluar la variable de interés en más de un momento a lo largo del tiempo (Supo y Zacarías, 2020).

3.1.1 ENFOQUE

El estudio es cuantitativo, pues las variables luego de ser evaluadas sirvieron para la afirmación o negación de la hipótesis planteada por el investigador. Según Sampieri (2003), el enfoque cuantitativo utiliza la compilación y el análisis de datos para responder preguntas de investigación y probar hipótesis previamente establecida.

3.1.2 ALCANCE O NIVEL

De acuerdo con el libro de metodología de la investigación científica de Supo y Zacarias (2020), el estudio fue de nivel aplicativo pues se busca solucionar el problema general planteado.

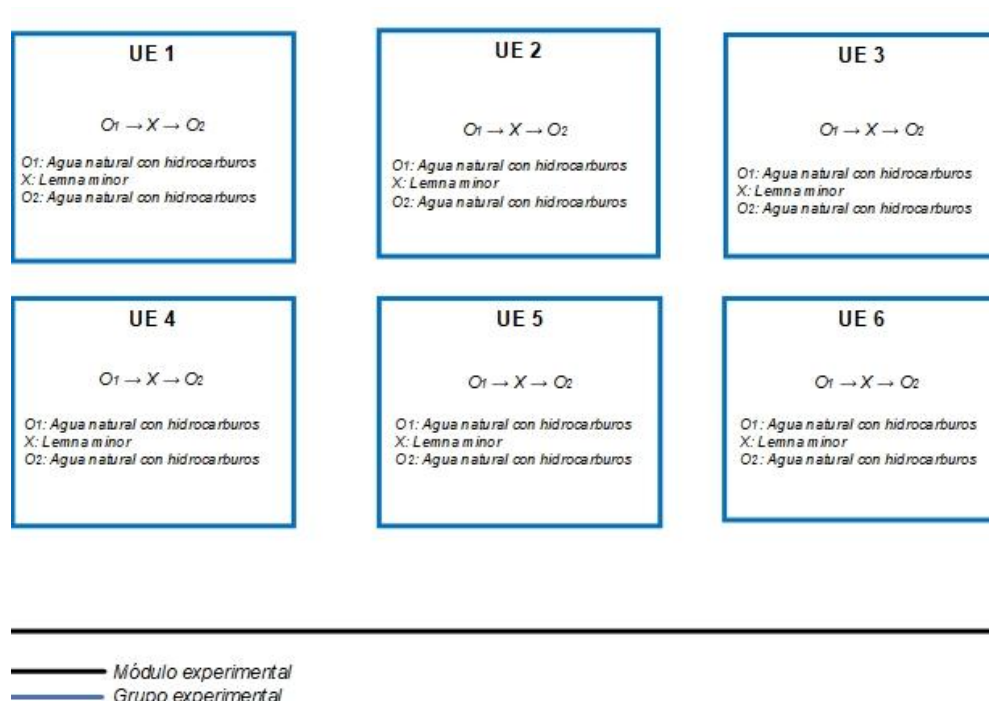
3.1.3 DISEÑO

La investigación fue cuasiexperimental, de tipo prospectivo – longitudinal; porque se intervendrá en las variables de estudio con el objetivo de estimar el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en de aguas contaminadas con hidrocarburos.

Se evaluarán dos veces los datos recolectados, antes y después de la intervención mediante análisis de laboratorio, para determinar si se logró o no un efecto fitorremediador significativo.

Figura 8

Esquema de diseño



Nota. La imagen muestra el esquema de diseño cuasiexperimental de la investigación. Donde las UE vienen a ser las unidades experimentales del grupo experimental.

Tabla 3

Grupo experimental de la investigación

Grupo Experimental Inicial (GEI)	Grupo Experimental con Intervención (GEX)	Grupo Experimental Final (GEF)
O ₁	X	O ₂
UE ₀ (2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50)		UE ₀ (2.02L de agua natural con hidrocarburos)
UE ₁ (2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50)	X (800 plántulas de <i>Lemna minor</i>)	UE ₁ (2.02L de agua residual resultante del proceso fitorremediador)
UE ₂ (2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50)	X (900 plántulas de <i>Lemna minor</i>)	UE ₂ (2.02L de agua residual resultante del proceso fitorremediador)
UE ₃ (2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50)	X (1000 plántulas de <i>Lemna minor</i>)	UE ₃ (2.02L de agua residual resultante del proceso fitorremediador)
UE ₄ (2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50)	X (1100 plántulas de <i>Lemna minor</i>)	UE ₄ (2.02L de agua residual resultante del proceso fitorremediador)
UE ₅ (2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50)	X (1200 plántulas de <i>Lemna minor</i>)	UE ₅ (2.02L de agua residual resultante del proceso fitorremediador)

Nota. La tabla muestra el modelo de diseño cuasiexperimental de la investigación. Metodología de los tipos y diseños de estudios más frecuentes usados en investigación clínica (Monterola et al., 2018).

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 POBLACIÓN

La población de estudio fue constituida por agua del río Huallaga. Para lo cual, se colectó 12 L de este recurso para su posterior división en las seis (06) unidades experimentales con 2 L de agua por cada una.

3.2.2 MUESTRA

La muestra estuvo conformada por 6 L de las aguas contaminadas con hidrocarburos, resultantes del proceso fitorremediador. Para lo que se consideró seis (06) unidades experimentales (UE₀, UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ y UE₅) para realizar tal proceso, de las cuales todas contenían la misma cantidad de agua natural (2 L).

En esa línea, cada unidad experimental fue inyectada con la misma dosis de Diésel B5 S-50 (0.2 mL). Es así como a cada una de ella se introdujo diferentes proporciones (plántulas) de *Lemna minor* (800, 900, 1000, 1100 y 1200) respectivamente.

Figura 9

Unidades experimentales de investigación



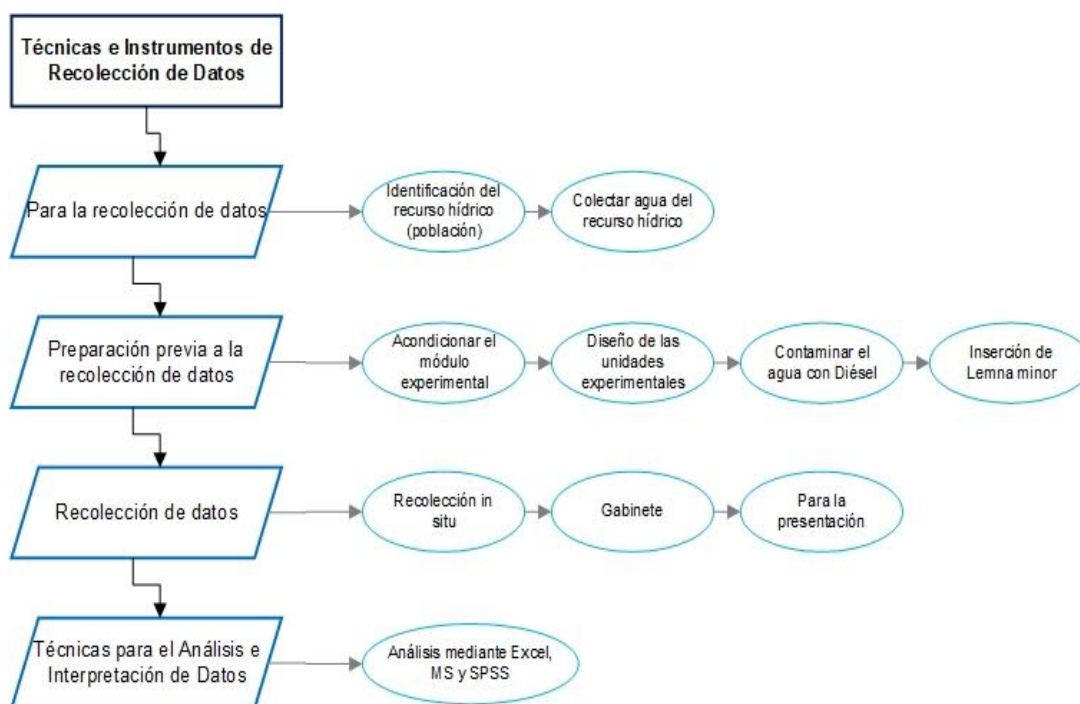
Nota. La imagen muestra las seis unidades experimentales con diferentes proporciones de *Lemna minor* en su primer día de proceso.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para poder aplicar las técnicas e instrumentos de recolección de datos, es preciso entender cuál es el procedimiento por cuál se registrará el experimento. Es así como, a continuación, se presenta el esquema simplificado de la ejecución del experimento.

Figura 10

Esquema de ejecución del experimento



Nota. El esquema muestra el procedimiento de ejecución del experimento y del uso de las técnicas e instrumentos de recolección de datos de acuerdo con el avance de las actividades.

3.3.1 PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Como parte preliminar para la recolección de datos, en primer lugar, se identificó el recurso hídrico del cual se colectó el agua que constituye la población de estudio, misma que en la posteridad fue contaminada con Diésel B5-S50 para su posterior tratamiento por el proceso de fitorremediación.

Para estimar la significancia del efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*), se realizó un análisis del agua tratada considerando lo establecido en los Estándares de Calidad para Agua (ECA). De acuerdo con el cuadro siguiente:

Tabla 4

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Variable evaluativa	Indicadores	Técnica	Instrumento
Fitorremediación de aguas con hidrocarburos	Según el D.S. N° 004-2017-MINAM:		
	Parámetros orgánicos	Documentación/Fichaje	Cadena de Custodia
	Hidrocarburos Totales de Petróleo (C ₈ – C ₄₀)		

Nota. La tabla muestra las técnicas e instrumentos que se usarán para la recolección de datos de la investigación. Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, 2016.

3.3.2 PREPARACIÓN PREVIA A LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Actividad previa al inicio de la experimentación, en la cual se realizó la identificación del punto de recolección del agua natural, el área donde se ejecutará el proyecto de investigación, dándole las condiciones lo más naturales posibles y diseñando las unidades experimentales. Asimismo, se hizo la georreferenciación mediante el uso de un GPS.

Por otro lado, se hizo la impresión del formato de ubicación del punto de muestreo, impresión del formato de cadena de custodia, impresión del formato de registro de datos de campo, impresión del formato de reporte de resultados del monitoreo del agua natural, impresión del formato de etiquetas para muestra de agua residual, pegado de las etiquetas a los frascos para la recolección de muestras, vestirse con guardapolvo blanco, casco de seguridad, mascarilla, colocarse guantes de nitrilo y proceder a la recolección de datos.

3.3.3 RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.3.1 *Materiales, equipos e indumentaria*

Para obtener datos correctos se utilizaron los siguientes materiales, equipos e indumentaria:

- **Materiales:** Cadena de custodia (formato), plumones, tablero de madera, baldes (2 L) mangueras de PVC de 3 mm de diámetro, llaves de paso de aire para pecera y jeringa tuberculina.
- **Equipos:** GPS, cámara fotográfica y dosificador de aire para peceras (bomba).
- **Indumentaria:** Casco de seguridad, mascarilla, guantes de nitrilo y guardapolvo.

3.3.3.2 *Recolección de datos in situ*

Para la recopilación de datos se usaron todos los Equipos de Protección Personal (EPP) y se siguieron todos los procedimientos que establece el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de Recursos Hídricos Superficiales, documento técnico aprobado por la Autoridad Nacional del Agua. Por lo cual se siguieron los siguientes procedimientos:

- **Identificación del punto para la recolección de agua natural:** Considerando la cercanía a la unidad experimental, se definió como punto de recolección el PM en las coordenadas E-364043 y N-8898556.
- **Recolección del agua natural:** Definido el punto en el agua natural, se procedió a recolectar una muestra de 20 L del recurso en un recipiente limpio.
- **División por unidad experimental:** Del agua natural recolectada, se realizó la separación en seis (06) unidades experimentales (UE₀, UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ y UE₅) de 2 L cada una.
- **Rotulado de unidades experimentales:** Listas las unidades experimentales, se hizo el rotulado en estos para poder identificar cada

una de acuerdo a su contenido codificación y contenido.

- **Inyección de Diésel B5 – S50:** Una vez rotuladas las unidades experimentales, se procedió con inyectar Diésel B5 – S50 en una dosis de 0.2 mL por cada una. Esto se llevó a cabo con una jeringa de tuberculina.
- **Emulsión:** Luego de inyectar el Diésel B5 – S50, se procedió con introducir las mangueras de aireación para lograr la mezcla homogénea de estos dos líquidos inmiscibles. El proceso de aireación para la UE₀ fue de una (01) hora. Mientras que, para las demás unidades fue de veinticuatro (24) horas diarias por los quince (15) días de estudio.
- **Recolección de la primera muestra:** La UE₀ fue colectada el día 16 de abril tras una (01) hora de hecha la emulsión. Se procedió con colectar 1 L de esta unidad para enviarla al laboratorio a su respectivo análisis de TPH.
- **Recolección de las UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ y UE₅:** La recolección de muestras para el análisis de TPH de estas unidades experimentales se hizo el día 30 de abril del 2024. Las muestras fueron de 1 L por cada una.

3.3.3.3 *Etapas de gabinete*

Luego de la recopilación de datos in situ, se procedió con la digitalización de estos para su posterior procesamiento con fines de cotejar los resultados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA-Agua) que dispone la norma ambiental vigente D.S. N° 004-2017-MINAM.

3.3.3.4 Para la Presentación de Datos

Se procedió a estimar la media, mediana, error estándar, desviación estándar y con ello estimar el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos.

3.3.4 TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

El análisis e interpretación de datos de la investigación “efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos”, se realizó con las técnicas siguiente:

Tabla 5

Técnicas de análisis e interpretación de datos para la investigación

Etapas	Técnica
Análisis	Sistemas de datos con Excel, MS y SPSS v24.
Interpretación	Comparación del parámetro con los ECA-Agua Redacción científica

Asimismo, para realizar la prueba estadística que, según Elorza (2000) es la regla convencional para comprobar o constatar hipótesis estadísticas; se siguieron los siguientes pasos:

3.3.4.1 Planteamiento de la hipótesis alterna (H_1) y la hipótesis nula (H_0)

Entendiéndose de esto que la hipótesis alterna plantea únicamente lo que se quiere demostrar. Mientras que la hipótesis nula plantea todo lo contrario.

3.3.4.2 Selección del nivel de significancia

El nivel de significancia refleja la probabilidad de rechazar la hipótesis nula. Por lo cual, se utilizó un nivel de significancia

de 0.05 (5%). Por lo cual, cuando el valor de p es inferior a este criterio, se rechaza la hipótesis nula y se aceptaría la alterna.

3.3.4.3 *Cálculo del valor estadístico de la prueba*

Para la prueba de hipótesis se empleó el método T Student. Del que Hernández, et al. (2010), afirma que es una prueba estadística donde es posible calcular las medias y la desviación estándar de la muestra.

3.3.4.4 *Formular la decisión*

De los valores obtenido se procede con formular si se acepta o rechaza la hipótesis nula.

3.3.4.5 *Tomar la decisión*

Se procede con tasar los valores estadísticos, para posteriormente aceptar o rechazar la hipótesis nula. Por lo que se debe entender que si el valor calculado es mayor o igual al valor crítico (prueba T Student).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS

Este capítulo describe el procesamiento de los datos del Efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos, en estricta función a los objetivos definidos en esta investigación. Por consiguiente, se realizaron los análisis de laboratorio en cuanto a la cuantía de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en seis (06) muestras de agua antes y después del tratamiento con *Lemna minor*, a fin de evaluar el efector fitorremediador de esta planta.

4.1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA

De acuerdo con el diseño de la investigación, se analizaron seis (06) muestras de agua residual de las unidades experimentales. Así pues, toda la primera muestra fue colectada el 16 de abril del 2024 y las cinco (05) restantes el 30 de abril del 2024. Las muestras fueron preservadas y refrigeradas de acuerdo con los lineamientos del protocolo de monitoreo de aguas superficiales, para mantener su integridad hasta el momento del análisis.

4.1.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TPH EN LAS MUESTRAS DE AGUA

4.1.2.1 Concentración de TPH

Considerándose que las unidades experimentales fueron inyectadas con la misma dosis de Diésel B5 S-50 (0.2mL) y que previo a la inserción de las lentejas de agua (*Lemna minor*) se tomó como muestra control la UE0 para que a partir de esta se pueda estimar el efecto remediador de la planta, se debe resaltar que el proceso fitorremediador se hizo por un periodo de catorce (14) días.

Es así como, de la primera muestra (UE₀) se obtuvo como resultado 39.48 mg/L de TPH. Dato base que permitió estimar el

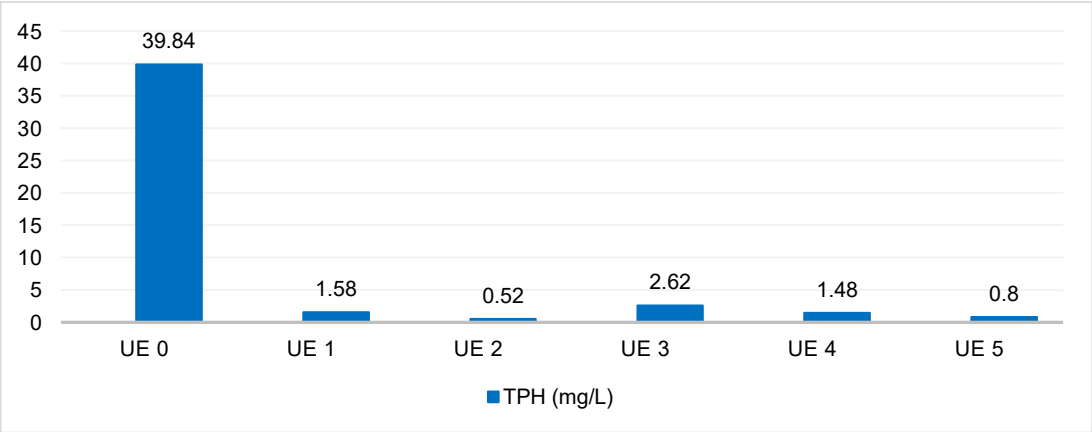
efecto fitorremediador de la lenteja de agua en comparación con las demás unidades experimentales (UE 1, UE 2, UE 3, UE 4 y UE 5). Tal y como se muestra a continuación:

Tabla 6
Resultados del análisis de TPH en las muestras de agua

Código	Fecha de muestreo	Hora de muestreo	Condiciones de la muestra	TPH (mg/L)
Pre test				
UE 0	2024-04-16	06:00	Refrigerada/preservada	39.84
Post test				
UE 1	2024-04-30	18:11	Refrigerada/preservada	1.58
UE 2	2024-04-30	18:12	Refrigerada/preservada	0.52
UE 3	2024-04-30	18:13	Refrigerada/preservada	2.62
UE 4	2024-04-30	18:14	Refrigerada/preservada	1.48
UE 5	2024-04-30	18:15	Refrigerada/preservada	0.80

Nota. Los datos de TPH para cada muestra responden al resultado del análisis de laboratorio, antes y después de la intervención.

Figura 11
Concentración de TPH en las muestras de agua



Nota. El gráfico de barras muestra las variaciones por unidad experimental en cuanto a la concentración de TPH.

4.1.2.2 *Análisis de la variación en la concentración de TPH en las muestras*

La variación en la concentración de TPH es evidente. Tomando como referencia el resultado de la muestra control (UE₀). Siendo las unidades experimentales UE₂ y UE₅ las de menor concentración de TPH, lo que sugiere la efectividad de la *Lemna minor*. No obstante, debido a fallas técnicas durante el proceso de aireación para lograr la emulsión entre el agua natural y el Diésel B5 S-50 en las UE₃ y UE₄ (sin aireación por un periodo de 20 horas), se presume que el proceso se entorpeció. Pero, aun así, se deja entrever que hubo reducción en la concentración de TPH.

4.1.2.3 *Eficiencia del proceso de fitorremediación*

En vista que los resultados denotan una notable reducción en los niveles de TPH en las muestras, es de sugerir que la lenteja de agua (*Lemna minor*) tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.2.1 ESTADÍSTICO DESCRIPTIVOS

A continuación, se presenta los estadísticos descriptivos en relación con las concentraciones de TPH en las muestras de cada unidad experimental, antes y después del tratamiento con la lenteja de agua *Lemna minor*).

Tabla 7*Estadísticos descriptivos del estudio*

Código	Muestra	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media
UE ₀	Inicial	39.8400	-	-
UE ₂				
UE ₃				
UE ₄	Final	1.4000	0.8572	0.3648
UE ₅				

Nota. Los datos mostrados responden a lo procesado en el software SPSS.

De lo expresado en la tabla 7, se revela la reducción en las concentraciones de TPH después del tratamiento con lenteja de agua (*Lemna minor*). La media de la concentración de TPH en las muestras finales refleja una considerable reducción en contraste con la muestra inicial. La baja desviación estándar entre las muestras finales indica que los valores de TPH son relativamente consistentes, lo que sugiere un tratamiento eficaz.

4.2.2 HIPÓTESIS

4.2.2.1 Hipótesis nula (H0)

Se plasma que la lenteja de agua (*Lemna minor*) no tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

4.2.2.2 Hipótesis alterna (H1)

Se plasma que la lenteja de agua (*Lemna minor*) tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

4.2.3 PRUEBA DE HIPÓTESIS

Para evaluar la hipótesis se procedió a realizar la prueba T para la igualdad de medias, a fin de comparar las medias de las concentraciones de TPH en relación de la muestra inicial con las muestras finales. Tal y como se puede apreciar, a continuación:

Tabla 8

Prueba de muestras independientes

		Prueba Levene de igualdad de varianzas				Prueba t para la igualdad de medias			
		F	Sig.	t	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	Intervalo de confianza (95%)

4.2.3.1 Interpretación

Entiéndase que el valor t es de 43.018 y es extremadamente alto, lo que puede interpretarse en una diferencia significativa entre las medias de las muestras (pre y post).

En lo que son los grados de libertad (GI) se tiene 4, numero bajo debido al tamaño de la muestra. Esto es relevante para la interpretación del valor y su significancia.

La significancia (bilateral) p – value es significativamente menor que 0.05, lo que indica que los resultados son estadísticamente significativos. Lo que conlleva al rechazo de la hipótesis nula.

En lo que sería la diferencia de medias el valor es de 38.44000 mg/L, lo que representa la diferencia promedio en las concentraciones de TPH entre la muestra inicial y las muestras finales. Lo que sugiere una reducción significativa en los niveles de TPH después del tratamiento con *Lemna minor*.

La diferencia de error estándar indica un valor de 0.89358 mg/L y deja ver la variabilidad de la diferencia de medias. El error estándar relativamente bajo refuerza la precisión de la diferencia de medias calculada.

El intervalo de confianza del 95% para la diferencia de medias es preciso y confiable. Esto significa que se puede asegurar al 95% la verdadera diferencia de medias está entre los valores inferior y superior.

4.2.3.2 Deducción

Dado que el valor p es 0.000, por debajo del nivel de significancia (0.05), podemos rechazar la hipótesis nula. Todo esto a razón de que se evidencia estadísticamente la significancia de afirmar que la lenteja de agua (*Lemna minor*)

tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS

La investigación intitulada “efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos”, según los resultados del análisis de laboratorio se evidencia que, en relación a la concentración inicial de TPH, se refleja un efecto fitorremediador significativo. Sabiéndose que la UE₀ como muestra de control sólo estaba comprendido por agua natural (2 L) y 0.2 mL de Diésel B5 S-50.

Es así como, para la UE 1 se utilizaron ochocientas (800) plántulas de *Lemna minor*, lo que resultó en la reducción de 38.26 mg/L de TPH. Es decir, en el proceso de fitorremediación de 2 L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50, luego de catorce (14) días de tratamiento se obtuvo una reducción en la concentración de TPH a 1.58 mg/L.

Para la UE 2 se utilizaron novecientas (900) plántulas de *Lemna minor*, lo que resultó en la reducción de 39.32 mg/L de TPH. Es decir, en el proceso de fitorremediación de 2 L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50, luego de catorce (14) días de tratamiento se obtuvo una reducción en la concentración de TPH a 0.52 mg/L.

Para la UE 3 se utilizaron mil (1000) plántulas de *Lemna minor*, lo que resultó en la reducción de 37.22 mg/L de TPH. Es decir, en el proceso de fitorremediación de 2L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50, luego de catorce (14) días de tratamiento se obtuvo una reducción en la concentración de TPH a 2.62 mg/L.

Para la UE 4 se utilizaron mil cien (1100) plántulas de *Lemna minor*, lo que resultó en la reducción de 38.36 mg/L de TPH. Es decir, en el proceso de fitorremediación de 2 L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50, luego de catorce (14) días de tratamiento se obtuvo una reducción en la concentración de TPH a 1.48 mg/L.

Finalmente, para la UE ₅ se utilizaron mil doscientas (1200) plántulas de *Lemna minor*, lo que resultó en la reducción de 39.04 mg/L de TPH. Es decir, en el proceso de fitorremediación de 2 L de agua natural con 0.2 mL de Diésel B5 S-50, luego de catorce (14) días de tratamiento se obtuvo una reducción en la concentración de TPH a 0.80 mg/L.

Considerando los resultados predichos y que, el agua natural con la que se hizo la investigación está considerada como Categoría 4 “conservación del ambiente acuático” y, además, de acuerdo con el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para Agua, el estándar de calidad del recurso hídrico para TPH es de 0.5 mg/L, la investigación pudo reducir notablemente la concentración de TPH al punto de estar próximo al ECA.

CONCLUSIONES

La investigación sugiere que la lenteja de agua (*Lemna minor*) tiene influencia efectiva en cuerpos de agua contaminados por hidrocarburos (Diésel B5 S-50), pues su presencia ha reducido las concentraciones de TPH en cada unidad experimental, denotándose que hay mayor influencia de esta especie cuando su población es más grande.

La investigación evoca que el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos es significativo, pues las concentraciones de TPH disminuyeron representativamente en cada unidad experimental, con lo que podría darse por demostrado que esta especie tiene un efecto válido sobre aguas con Diésel B5 S-50 en la fracción de $C_8 - C_{40}$.

La investigación confirma que el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos es notoria, pues la concentración inicial de hidrocarburos (Diésel B5 S-50) fue de 39.84 mg/L y luego de la intervención esta se redujo significativamente a la media de 1.40 mg/L en la fracción de $C_8 - C_{40}$.

RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados de la investigación, se recomienda realizar estudios complementarios a fin de obtener datos más específicos de la aplicación de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en cuerpos de agua contaminados con diferentes tipos de hidrocarburos y en diversas condiciones ambientales.

A sabiendas de lo que refleja la investigación sobre el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos, se recomienda realizar la aplicación de esta especie acuática en aguas naturales que hayan sido afectadas por derrames de hidrocarburos.

Por último, se recomienda que para usar la lenteja de agua (*Lemna minor*) en cuerpos de agua naturales se considere su tasa de crecimiento, pues es una especie de fácil adaptabilidad y su incremento poblacional desproporcionado podría suponer una alteración del componente natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, L., Mazo L. y Suárez, A. (2005). *Revista Lasallista de Investigación*, p. 59. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520110.pdf>
- Alvarado, K. (2018) *Influencia del uso de Lemna minor en el tratamiento de la contaminación orgánica de los efluentes industriales de Cotexsur, Lurin, 2017* [Tesis de Maestría, Universidad de Huánuco]. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2394>
- Bazo, A. (2022) *Derrame de Petróleo en Perú: una negligencia que se cobró fauna y seguirá afectando vidas*. <https://www.france24.com/es/medio-ambiente/20220202-peru-derrame-petroleo-repsol-especies-animales>.
- Caisachana I. y Muñoz D. (2020) *Evaluación de un proceso de fitorremediación mediante lenteja de agua (Lemna minor) para agua residual proveniente de una empresa azucarera*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Agraria de Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/CAISACHANA%20RAMOS%20IS AAC%20EZEQUIEL.pdf>
- Caja, A. (2020) *Evaluación del riesgo ambiental acuático de petróleo crudo en: Lemna minor (GRIFF), Daphnia magna (STRAUS) y Danio reiro (HAMILTON-BUCHANAN)*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Científica del Sur]. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1432/TL-Caja%20A-Ext.pdf?sequence=10&isAllowed=y>
- Cubillos, J. (2011) *Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos*. [Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://core.ac.uk/download/pdf/71396864.pdf>
- Department of Health and Human Services, Public Health Service (1995). Toxicological profile for fuel oils. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp75-c3.pdf>

- Dirección Regional de Energía y Minas (2021). *Hidrocarburos*.
<https://www.gob.pe/institucion/regionpiura-drem/noticias/618469-que-son-los-hidrocarburos>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba.
https://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
- Foro de la Industria Nuclear Española (2023) *¿Qué es el petróleo y que usos tiene?*
<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-el-petroleo-y-que-usos-tiene/>
- García, J. y Corzo, A. (2008). *Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistema de Humedales de Flujo Subsuperficial*.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García, Z. (2012) *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/1292>
- Gutiérrez A. (2010) *Evaluación de la biomasa y manejo de Lemna gibba (lenteja de agua) en la bahía interior del Lago Titicaca, Puno*. [Artículo de investigación]. Universidad Nacional de los Andes. Evaluación de la biomasa y manejo de Lemna gibba (lenteja de agua) en la bahía interior del Lago Titicaca, Puno
- Malaver, F. (2013) *Evaluación de un humedal artificial de flujo superficial empleando lenteja de agua (Lemna minor) para el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria de curtiembres* [Tesis de Título Profesional, Universidad Libre de Colombia].
<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9999/Evaluaci%C3%B3n%20de%20un%20Humedal%20artificial%20de%20flujo%2>

0superficial%20empleando%20lenteja%20de%20agua%20%28Lemna%20minor%29%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ministerio del Ambiente (2016) *Salud y ambiente*, p. 10.
<https://www.minam.gob.pe/educacion/wp-content/uploads/sites/20/2017/02/Publicaciones-1.-Texto-de-consulta-M%C3%B3dulo-1-1.pdf>

Ministerio del Ambiente (2016) *Glosario de Términos, sitios contaminados*.
<https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2015/02/2016-05-30-Conceptos-propuesta-Glosario.pdf>

León, M. y Lucero, A. (2009). *Estudio de eichnoría crassipes, lemna gibba y azolla filiculoides en el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas en sistemas comunitarios y unifamiliares del cantón cotachi* [Tesis de Título Profesional, Universidad Técnica del Norte].
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/102/1/03%20REC%20108%20TESIS.pdf>

Petroperú (2024). *Diésel Ultra*.
<https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/diesel-ultra/>

Rodríguez, A. (2017). *Diseño de un humedal artificial para el municipio arcas de las salinas (teruel)* [Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Valencia].
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89917/RODR%C3%8DGUIEZ%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20humedal%20artificial%20para%20el%20municipio%20de%20Arcas%20de%20las%20Salinas%20%28Teruel%29.pdf?sequence=1>

Saffon, I. (2015) *Remoción de Hidrocarburos en aguas usando tecnologías de fitorremediación*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Católica de Manizales].
<https://repositorio.ucm.edu.co/entities/publication/9e5ae6c7-9a57-469f-87da-888daba399ff>

- Suárez, R. (2021) *Fitorremediación: una alternativa para reducir la contaminación por hidrocarburos en Ecuador*. [Tesis de Título Profesional, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6301/1/UPSE-TIA-2021-0040.pdf>
- Supo J. y Zacarías H. (2020). *Metodología de la Investigación Científica: para las ciencias de salud y las ciencias sociales*. Independently published.
- Vázquez, C; Ordóñez, C & Gonzáles, G. (2022). *Derrame de petróleo y sus efectos sobre la salud*. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1728-59172022000100096
- Wauquier, J. (2004). *El refino del Petróleo*. Instituto Francés del Petróleo. https://books.google.com.pe/books?id=dwkg8u2MmIC&lpg=PR13&ots=eEgW_zQjqY&dq=petroleo&lr&hl=es&pg=PR6#v=onepage&q=petroleo&f=false

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Amado J. Efecto fitorremediador de la lenteja de agua (*Lemna minor*) en aguas contaminadas con hidrocarburos [Internet] Huánuco: Universidad de Huánuco; 2025 [Consultado]. Disponible en: <https://...>

ANEXOS

ANEXO 1

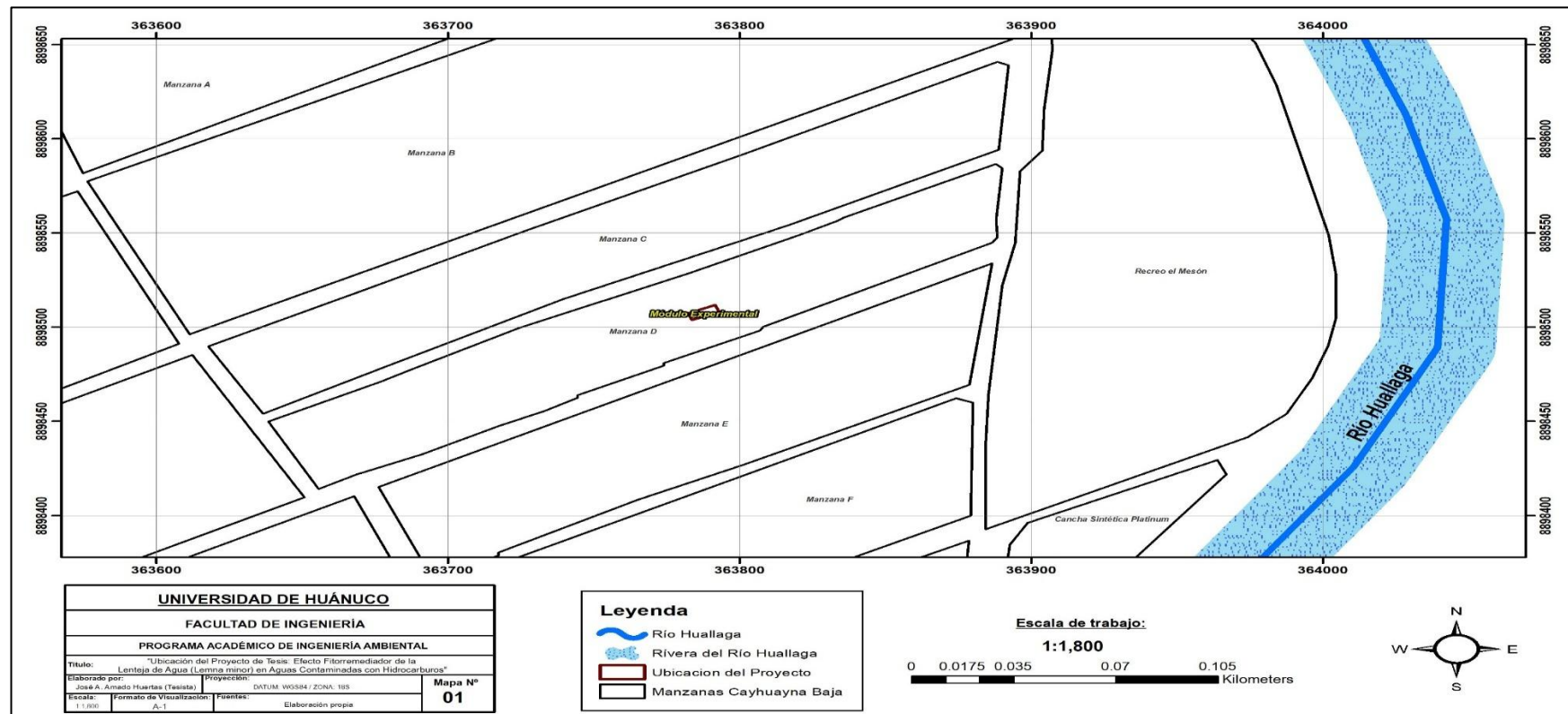
MATRIZ DE CONSISTENCIA

EFFECTO FITORREMEDIADOR DE LA LENTEJA DE AGUA (LEMNA MINOR) EN AGUAS CONTAMINADAS CON HIDROCARBUROS.

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables / Indicadores	Método
¿Cuál es el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos?	Evaluar el efecto fitorremediador de lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) aguas contaminadas con hidrocarburos.	La lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) tiene un efecto fitorremediador significativo en aguas contaminadas con hidrocarburos.	Variable de calibración: <i>Lemna minor</i>	Tipo de investigación: Experimental: con intervención planificación, analítico y longitudinal.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos		Variable evaluativa: Aguas contaminadas con hidrocarburos: Hidrocarburos Totales de Petróleo (C ₈ – C ₄₀).	Enfoque: cuantitativo Alcance o nivel: Aplicativo Diseño: Cuasiexperimental Población: Aguas del río Huallaga.
¿Cómo influye el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50)? ¿Cuál es el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50) en la fracción de C₈ – C₄₀? ¿En qué medida varía el efecto fitorremediador antes y después de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50)?	Determinar cómo incluye el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50). Determinar cuál es el efecto fitorremediador de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50) en la fracción de C₈ – C₄₀. Comparar el efecto fitorremediador antes y después de la lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) en aguas contaminadas con hidrocarburos (Diésel B5 S-50).			Muestra: 10L de las aguas contaminadas con hidrocarburos, resultantes del proceso fitorremediador. Técnica e instrumentos de recolección de datos: documentación, cadena de custodia (Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales) y análisis de la muestra.

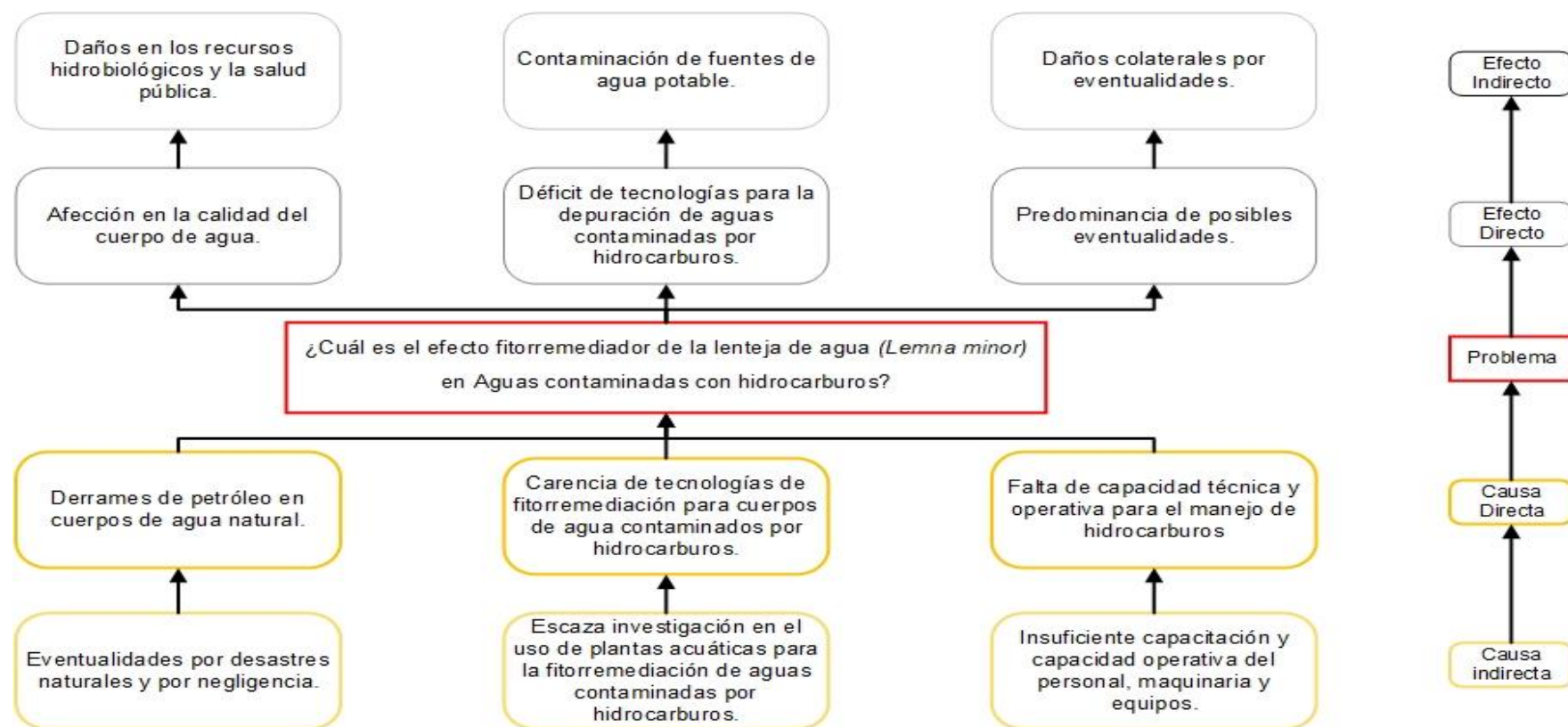
ANEXO 2

PLANO DE UBICACIÓN DEL PROYECTO



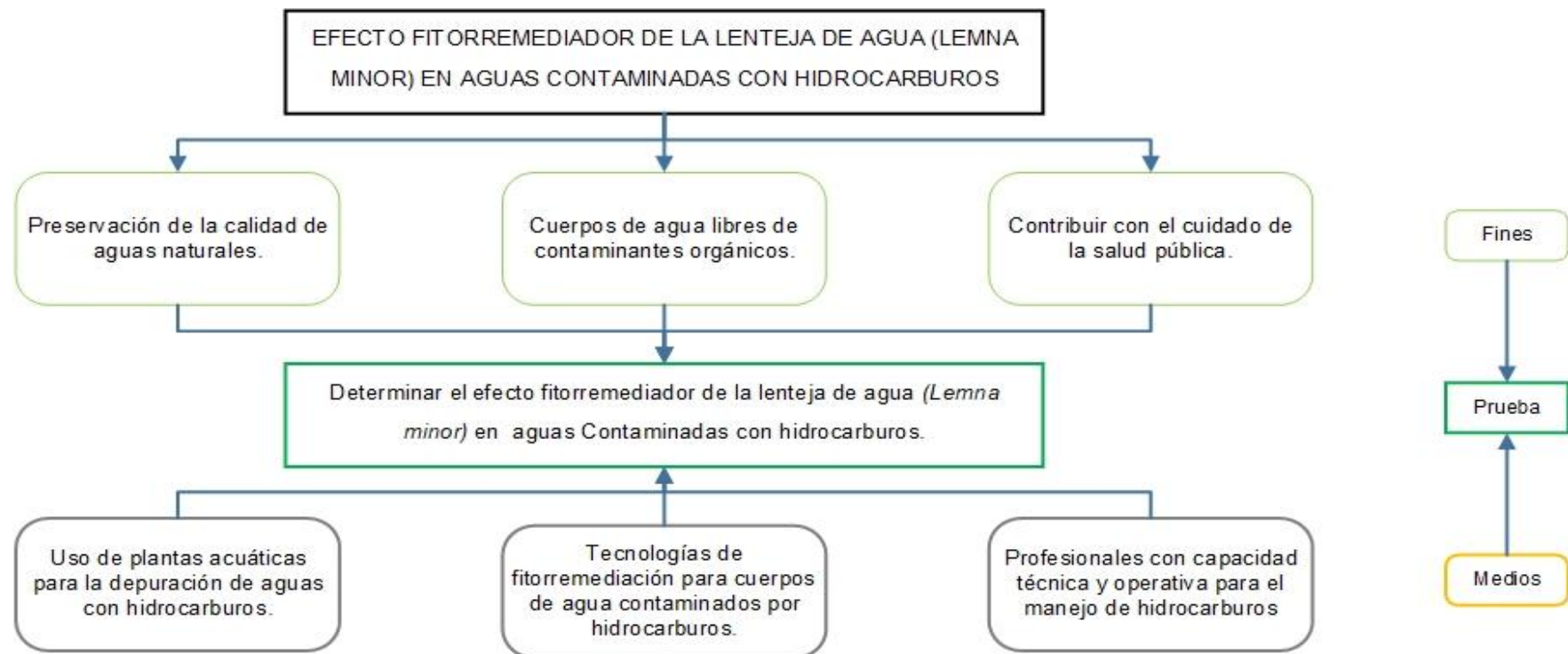
ANEXO 3

DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO



ANEXO 4

DIAGRAMA DE MEDIOS Y FINES



ANEXO 5

FICHA UBICACIÓN DEL PUNTO DE MONITOREO

Registro de Identificación del Punto de Monitoreo

Nombre del cuerpo de agua:			
Clasificación del cuerpo de agua:			
(Categorizado de acuerdo a la R.L. N°202-2010-ANA y modificaciones posteriores)			
Código y nombre de la cuenca o del cuerpo marino-costero:			
(Código Platón)			
IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO			
Código del punto de monitoreo:			
(Según lo indicado en ítem 6.5.4 del Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales)			
Descripción:			
(Origen/Ubicación)			
Accesibilidad:			
(Describir detalladamente la vía de acceso, para que otras personas puedan encontrar fácilmente el punto de monitoreo)			
Representatividad:			
(Describir el tramo de río o quebrada o la bahía o zona de laguna a mar, que el punto de monitoreo representa)			
Finalidad del monitoreo:			
(Describir la finalidad del punto de monitoreo: Vigilancia de un uso, evaluación del impacto de una fuente contaminante,)			
Reconocimiento del Entorno:			
(Indicar referencias topográficas que permiten el fácil reconocimiento del punto en campo.)			
UBICACIÓN			
Distrito:	Provincia:	Departamento:	
Localidad:			
Coordenadas (WGS84):	Sistema de coordenadas:	☐ Proyección UTM	
		☐ Geográficas	
Norte/Latitud:		Zona:	(17, 18 o 19; para UTM solamente)
Este/Longitud:		Altitud:	(metros sobre el nivel del mar)
Croquis de Ubicación del Punto de Monitoreo (referencia)		Fotografía:	
		(tomada a un mínimo de 20 mts. de distancia del punto de monitoreo)	

Elaborado por _____ Fecha _____

Nota. En la siguiente imagen se denota el proceso de identificación del punto de monitoreo para el área de investigación. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de Aguas Superficiales, anexo IV. 2016.

ANEXO 8

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE TPH (PRE TEST)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
INTERNATIONAL ACCREDITATION SERVICE, INC. - IAS
CON REGISTRO TL - 829



INFORME DE ENSAYO N° 1802742-2024 CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL : AMADO HUERTAS JOSÉ ALEJANDRO
DOMICILIO LEGAL : CALLE LOS SAUCES MZ. D LOTE 14 - PILLCO MARCA - HUÁNUCO - HUÁNUCO
SOLICITADO POR : AMADO HUERTAS JOSÉ ALEJANDRO
REFERENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2024-04-17
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2024-04-17 AL 2024-04-26
FECHA(S) DE MUESTREO : 2024-04-16
MUESTREADO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C.	Unidades
Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) Range: C ₆ -C ₄₀	EPA Method 8015 C. Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography. Rev 3 / February 2007.	0.01	mg/L

L.C.: límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Agua Residual	
Matriz analizada	Agua Residual	
Fecha de muestreo	2024-04-16	
Hora de inicio de muestreo (h)	06:00	
Coordenadas	364043E	
Condiciones de la muestra	8898556N	
Código del Cliente	Refrigerada/ Preservada	
Código del Laboratorio	UEO	
Ensayo	24041544	
	Unidades	
	Resultados	
Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) Range: C ₆ -C ₄₀	mg/L	39.84

Lima, 29 de Abril del 2024.

ING. TELLO PAUCAR
MARILU
SERVICIOS ANALÍTICOS
GENERALES SAC
Firmado con www.tocapu.pe

DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

EXPERTS
WORKING
FOR YOU

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del Organismo Internacional de Acreditación-IAAC, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: • Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: Validez de firma: firma válida, de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorio: Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Rios Norte - Lima • Oficinas Administrativas Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 - Lima
• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

Página 1 de 1

ANEXO 9

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE TPH (POST TEST)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
INTERNATIONAL ACCREDITATION SERVICE, INC. - IAS
CON REGISTRO TL - 829



INFORME DE ENSAYO N° 1803368-2024
CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL : AMADO HUERTAS JOSÉ ALEJANDRO
DOMICILIO LEGAL : CAL. LOS SAUCES MZ. D LT. 14 - PILLOCO MARCA - HUÁNUCO - HUÁNUCO
SOLICITADO POR : AMADO HUERTAS JOSÉ ALEJANDRO
REFERENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA : RESERVADO POR EL CLIENTE
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2024-05-02
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2024-05-02 AL 2024-05-06
FECHA(S) DE MUESTREO : 2024-04-30
MUESTREADO POR : EL CLIENTE
CONDICIÓN DE LA MUESTRA : LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS SE APLICAN A LA MUESTRA(S) TAL COMO SE RECIBIÓ.

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C	Unidades
Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) Range: C ₆ -C ₂₄	EPA Method 8015 C. Nonhalogenated Organics by Gas Chromatography: Rev 3/ February 2007.	0.01	mg/L

L.C.: límite de cuantificación.

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
Matriz analizada	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
Fecha de muestreo	2024-04-30	2024-04-30	2024-04-30	2024-04-30
Hora de inicio de muestreo (h)	18:11	18:12	18:13	18:14
Condiciones de la muestra	Refrigerada/ Preservada	Refrigerada/ Preservada	Refrigerada/ Preservada	Refrigerada/ Preservada
Código del Cliente	UE1	UE2	UE3	UE4
Código del Laboratorio	24050007	24050008	24050009	24050010

ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829

Ensayo	Unidades	Resultados
Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) Range: C ₆ -C ₂₄	mg/L	1.58 0.52 2.62 1.48

Producto declarado	Agua Residual
Matriz analizada	Agua Residual
Fecha de muestreo	2024-04-30
Hora de inicio de muestreo (h)	18:15
Condiciones de la muestra	Refrigerada/ Preservada
Código del Cliente	UE5
Código del Laboratorio	24050011

ENSAYO ACREDITADO ANTE IAS-829

Ensayo	Unidades	Resultados
Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) Range: C ₆ -C ₂₄	mg/L	0.8

Lima, 13 de Mayo del 2024.

ING. TELLO PAUCAR
MARILU
SERVICIOS ANALITICOS
GENERALES SAC
Firmado con www.tocapu.pe

DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

EXPERTS
WORKING
FOR YOU

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del Organismo Internacional de Acreditación-IAS, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: "Validez de firma: firma válida", de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorio: Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Rios Norte - Lima • Oficinas Administrativas Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 - Lima
• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

Página 1 de 1

Figura 12

Recolección de agua natural del Río Huallaga.



Figura 13

Unidades experimentales



Figura 14

Unidades experimentales con agua natural



Figura 15

Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE0

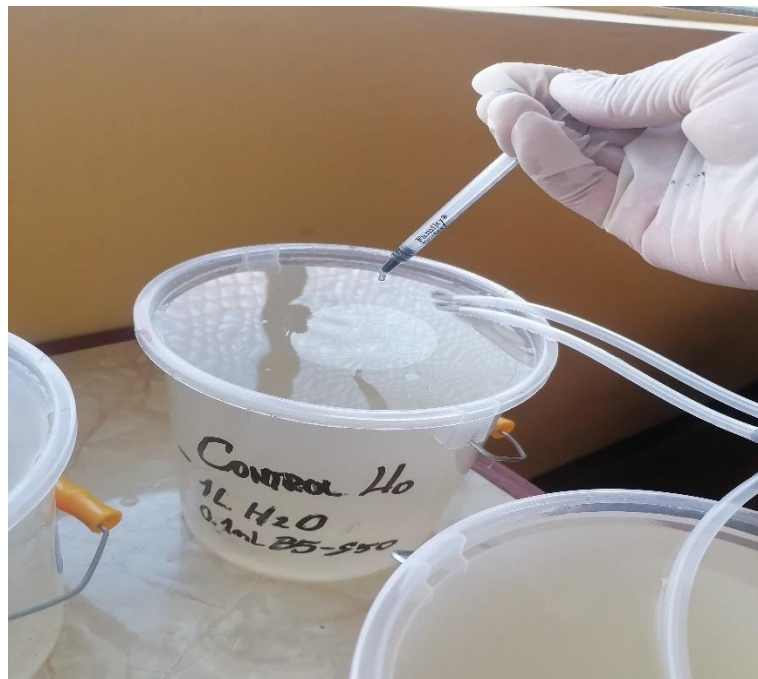


Figura 16

Aireación en la unidad experimental para la emulsión entre el Diésel DB5-S50 y el agua natural.



Figura 17

Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE

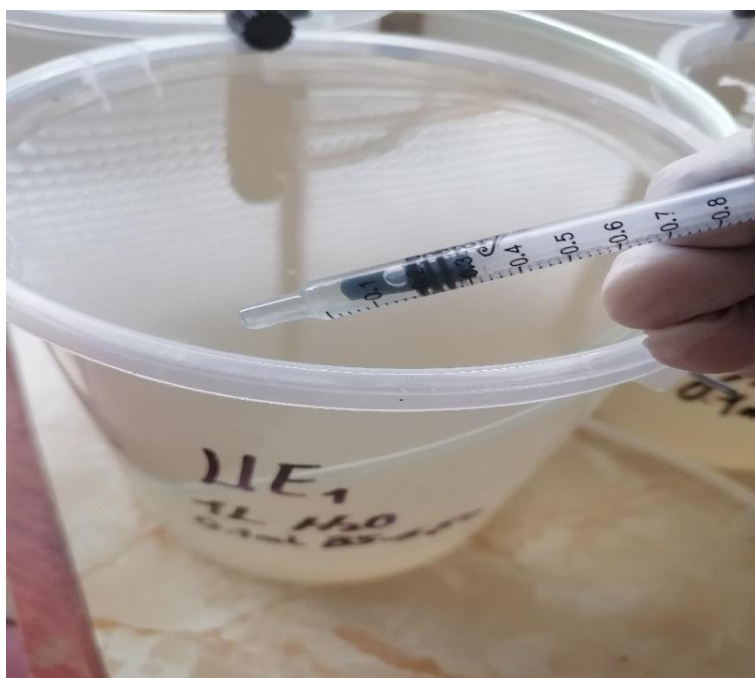


Figura 18

Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE₂

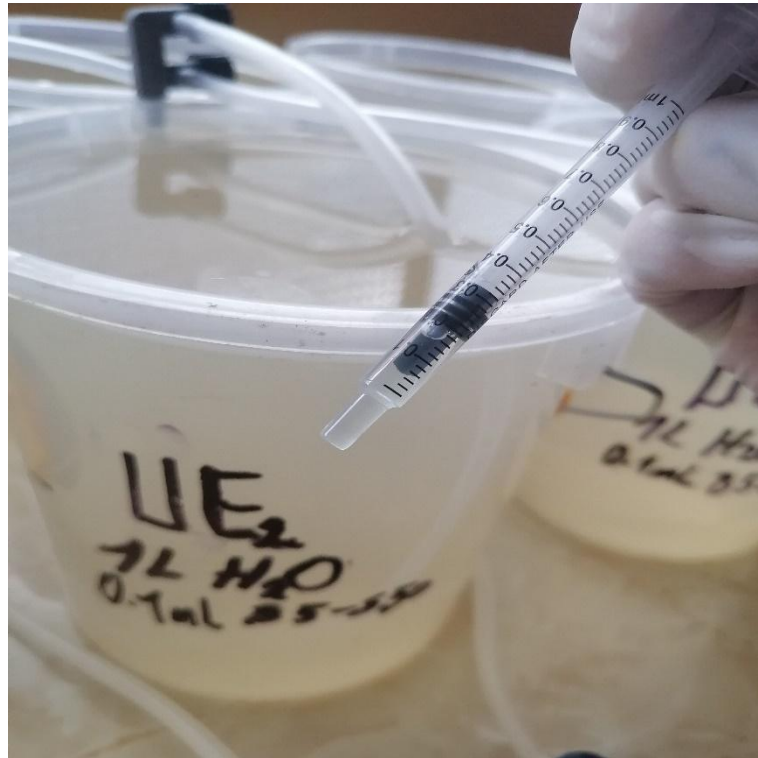


Figura 19

Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE₃

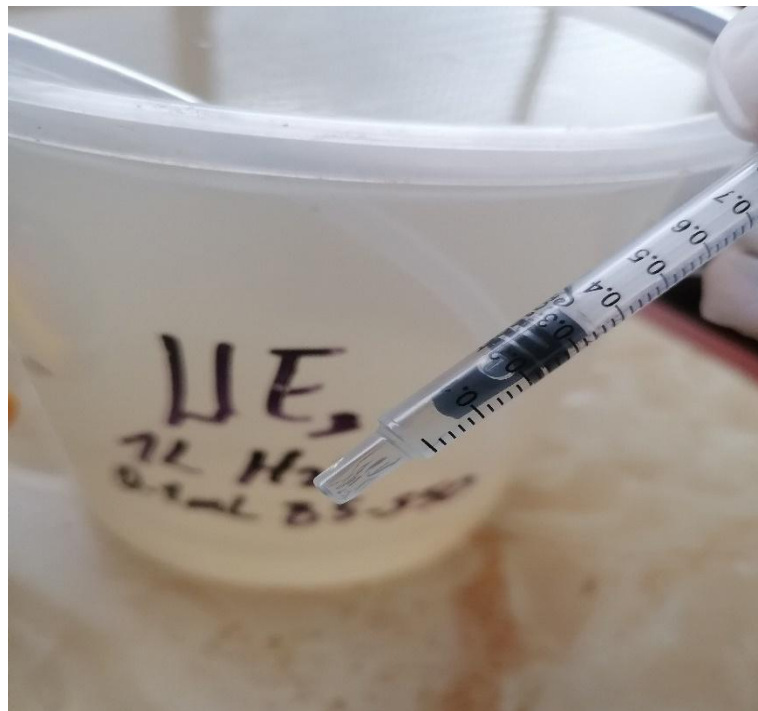


Figura 20

Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE₄



Figura 21

Inyección de Diésel DB5-S50 en la unidad experimental UE₅

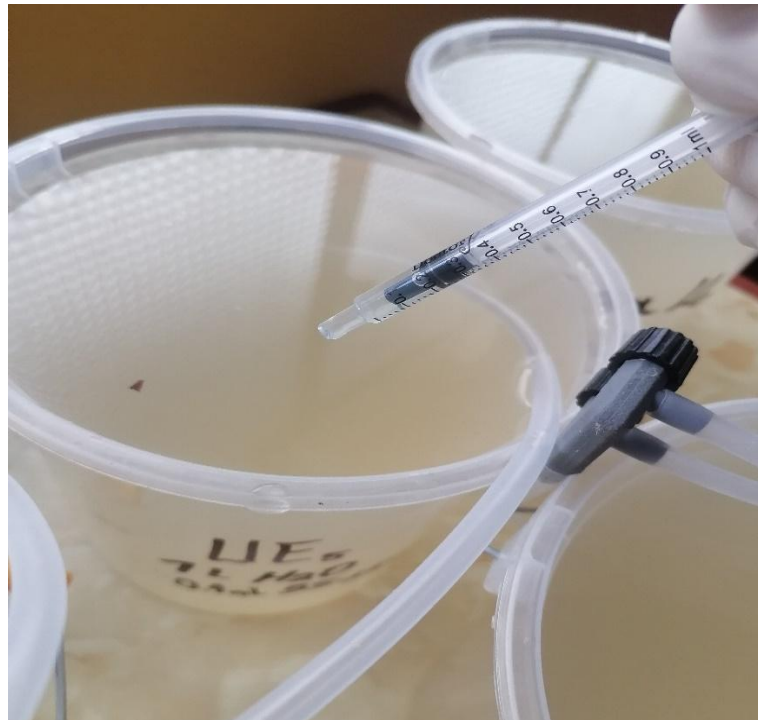


Figura 22

Aireación en las unidades experimentales para la emulsión entre el Diésel DB5-S50 y el agua natural.



Figura 23

Proceso de fitorremediación en las unidades experimentales



Figura 24

Toma de muestra de la UE₀ para su análisis de TPH en laboratorio



Figura 25

Toma de muestras de la UE₁, UE₂, UE₃, UE₄ y UE₅ para su análisis de TPH en laboratorio

