

**EVALUACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PETROLEO MEDIANO POR MEDIO DEL PASTO *MEGATHYRSUS MAXIMUS*, EL GIRASOL *HELIANTHUS ANNUUS L* Y EL TRIGO *TRITICUM AESTIVUM* EN EL CAMPO VELASQUEZ DE MANSAROVAR ENERGY UBICADO EN PUERTO BOYACÁ**

**SANTIAGO CASAS CERÓN  
JUAN SEBASTIAN PINEDA ROA**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director  
ANGIE TATIANA ORTEGA RAMIREZ**

**Ingeniería química**

**Asesor  
YATNIELAH ISBEL PIRELA ROPERO  
Ingeniera de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Ingeniera Yatnielah Isbel Pirela

---

Ingeniera Angie Tatiana Ortega Ramírez

Bogotá D.C., junio de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro  
Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional  
Dr. Luis Jaime Posada García

Vicerrectora Académica de investigaciones  
Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero  
Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General  
Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías  
Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director (E) Programa de Ingeniería de Petróleos  
Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director (E) Programa de Ingeniería de Química  
Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

*A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, colmarme de sabiduría, paciencia y fortaleza. A mi mamá, papá y hermana por su compañía incondicional, por su cariño, amor y esfuerzo que han puesto en darme las capacidades para poder realizar todo.*

*A Mapis por siempre estar a mi lado apoyándome y dándome consejos. A Capi porque gracias a él pude realizar todo esto, le deseo lo mejor y ojalá cumpla todos sus sueños y metas que tiene.*

*Finalmente, le agradezco a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa de mi vida, familia, profesores y amigos que me contribuyeron y formaron como la persona que soy.*

### ***Santiago Casas Cerón***

*A mi familia por ayudarme a culminar esta etapa tan especial de mi vida siendo la parte más importante en este proceso, dándome fortaleza, apoyo emocional y sabiduría.*

*A Casas mi compañero porque juntos logramos sacar adelante este proyecto, apoyándonos mutuamente y logrando los objetivos paso a paso.*

*Para finalizar, le agradezco a todas las personas que nos brindaron apoyo en la consecución del proyecto, ya sean profesores, directivos y conocidos, los cuales nos ayudaron a crecer como estudiantes y principalmente como personas.*

### ***Juan Sebastian Pineda Roa***

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Las ingenieras Angie Tatiana Ortega Ramírez y Yatnielah Isbel Pirela por su acompañamiento y apoyo continuo, por siempre atender nuestras inquietudes con la mejor disposición y por colaborarnos durante el desarrollo de todo el proyecto.

A Diego Alejandro Cruz Herrera y su familia por proporcionarnos toda su disposición y ayuda en la búsqueda de petróleo y suelo contaminado del campo Velásquez del municipio de Puerto Boyacá, por medio de los cuales se logró realizar y culminar este proyecto de grado.

A la familia Sánchez Bernal por permitirnos sembrar y experimentar el proyecto en su casa, además del cuidado de las plantas de estudio, logrando realizar la experimentación satisfactoriamente.

Al ingeniero Nelson Fernández Barrero por ofrecernos la oportunidad de realizar las pruebas de laboratorio, así como su ayuda, brindándonos su tiempo y conocimientos durante este trayecto

A la Fundación Universidad de América por guiar nuestra formación profesional, junto con todos los profesores que nos brindaron su conocimiento para culminar la carrera con buenas bases para el futuro profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
<b>RESUMEN</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Objetivo general</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos específicos</b>	<b>18</b>
<b>2. MARCO REFERENCIAL</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Marco teórico</b>	<b>19</b>
<i>2.1.1 Derrames</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2 Contaminación por hidrocarburos en Colombia</i>	<i>19</i>
<i>2.1.3 Derrames accidentales.</i>	<i>20</i>
<i>2.1.4 Derrames provocados-Ataques a oleoductos en Colombia</i>	<i>21</i>
<i>2.1.5 Biorremediación</i>	<i>22</i>
<i>2.1.6 Fitorremediación</i>	<i>23</i>
<i>2.1.7 Fitorremediación en Colombia</i>	<i>25</i>
<i>2.1.8 Tecnologías de remediación fisicoquímicas</i>	<i>25</i>
<i>2.1.9 TPH</i>	<i>26</i>
<i>2.1.10 Petróleos pesados</i>	<i>27</i>
<i>2.1.11 Diseño de experimentos</i>	<i>32</i>
<b>2.2 Marco legal</b>	<b>33</b>
<i>2.2.1 Ley 46 de 1988</i>	<i>33</i>
<i>2.2.2 Ley 99 de 1993</i>	<i>33</i>
<i>2.2.3 Ley 885 DE 2004</i>	<i>34</i>
<i>2.2.4 Ley 1523 de 2012</i>	<i>34</i>
<i>2.2.5 Decreto 919 de 1989</i>	<i>34</i>
<i>2.2.6 Decreto 2190 de 1995</i>	<i>34</i>
<i>2.2.7 Decreto 321 de 1999</i>	<i>34</i>
<i>2.2.8 Decreto 1076 de 2015</i>	<i>34</i>
<i>2.2.9 Decreto 50 de 2018</i>	<i>35</i>
<i>2.2.10 Resolución 1209 de 2018</i>	<i>35</i>
<i>2.2.11 Resolución 1486 de 2018</i>	<i>35</i>
<i>2.2.12 Lineamientos Plan de Contingencia - 2013</i>	<i>35</i>
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Fase inicial</b>	<b>39</b>
<i>3.1.1 Acoplamiento de suelos</i>	<i>39</i>
<i>3.1.2 Caracterización bibliográfica de las especies estudiadas</i>	<i>39</i>
<i>3.1.3 Siembra de las semillas</i>	<i>40</i>
<b>3.2 Fase experimentación</b>	<b>41</b>

3.2.1	<i>Observación del crecimiento de las plantas</i>	41
3.2.2	<i>Toma de muestras</i>	41
3.2.3	<i>Análisis de laboratorio</i>	42
3.3	<b>Fase final</b>	44
4.	<b>CARACTERIZACIÓN Y LABORATORIOS</b>	45
4.1	<b>Caracterización de las materias primas</b>	45
4.1.1	<i>Caracterización de las plantas</i>	45
4.1.2	<i>Caracterización del crudo</i>	53
4.1.3	<i>Caracterización del suelo</i>	56
4.2	<b>Sitio de estudio</b>	64
4.3	<b>Generalidades del diseño</b>	64
4.4	<b>Lugar de extracción suelo contaminado</b>	65
4.5	<b>Acondicionamiento del suelo contaminado</b>	66
4.6	<b>Diseño de experimentos</b>	67
4.6.1	<i>Diseño para hidrocarburos totales de petróleo (TPH)</i>	69
4.6.2	<i>Diseño para Carbono orgánico (C<sub>org</sub>)</i>	71
4.7	<b>Pruebas de laboratorio</b>	73
4.7.1	<i>TPH</i>	73
4.7.2	<i>pH</i>	73
4.7.3	<i>Porcentaje (%) de retención de humedad</i>	74
4.7.4	<i>Carbono orgánico</i>	76
5.	<b>ESTUDIO DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN</b>	78
6.	<b>ALCANCE</b>	88
7.	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	91
8.	<b>CONCLUSIONES</b>	103
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	107

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 1. HISTORIAL DE LOS ATAQUES A LOS OLEODUCTOS EN COLOMBIA ENTRE EL 2000 Y EL 2004.</b>	20
<b>FIGURA 2. DERRAME EN PUERTO BOYACÁ</b>	21
<b>FIGURA 3. MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES POR LA PLANTA</b>	24
<b>FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA GLOBAL DEL PROYECTO</b>	34
<b>FIGURA 5. REPRESENTACIÓN DE LA PREPARACIÓN DEL SUELO</b>	35
<b>FIGURA 6. REPRESENTACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	36
<b>FIGURA 7. REPRESENTACIÓN DE LA PARTE EXPERIMENTAL</b>	37
<b>FIGURA 8. REPRESENTACIÓN DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	39
<b>FIGURA 9. CICLO DE VIDA DEL GIRASOL</b>	43
<b>FIGURA 10. CICLO VIDA PASTO</b>	44
<b>FIGURA 11. CICLO DE VIDA DEL TRIGO</b>	45
<b>FIGURA 12. MATRIZ DE EVALUACIÓN DEL CRUDO CAMPOS MANSAROVAR ENERGY</b>	47
<b>FIGURA 13. REPRESENTACIÓN DE UN HIDRÓMETRO PARA DETERMINAR API</b>	48
<b>FIGURA 14. DATOS INTERÉS CAMPO VELÁSQUEZ</b>	51
<b>FIGURA 15. PARÁMETROS TAXONÓMICOS DEL SUELO</b>	51
<b>FIGURA 16. SUELO TIPO FLUVAQUENTIC EUTRUDEPTS.</b>	55
<b>FIGURA 17. SUELO DEL TIPO FLUVENTIC EUTRUDEPTS</b>	57
<b>FIGURA 18. SUELOS DE LA ASOCIACIÓN CHROMIC ENDOAQUERTS – HIDRIC SPHAGNOFIBRISTS.</b>	58
<b>FIGURA 19. SUELOS DEL TIPO OXIC DYSTRUDEPTS.</b>	59
<b>FIGURA 20. UBICACIÓN SITIO EXPERIMENTAL</b>	60
<b>FIGURA 21. UBICACIÓN DEL SUELO DE ESTUDIO.</b>	61
<b>FIGURA 22. ÁREA PARA TRATAR SIMULADA</b>	76
<b>FIGURA 23. MAPA DE CUENCAS SEDIMENTARIAS EN COLOMBIA</b>	86
<b>FIGURA 24. MAPA DE OLEODUCTOS EN COLOMBIA</b>	87
<b>FIGURA 25. CICLO VIDA DE PLANTAS</b>	89
<b>FIGURA 26. % REMEDIACIÓN ESPECIE-SUELO</b>	95
<b>FIGURA 27. PROMEDIO DE REMEDIACIÓN POR ESPECIE EN %.</b>	96
<b>FIGURA 28. RESULTADOS COT</b>	98

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>TABLA 1.</b> FASES SEGUIDAS PARA LA CONSECUCCIÓN DEL PROYECTO	32
<b>TABLA 2.</b> CARACTERIZACIÓN DE LAS PLANTAS	41
<b>TABLA 3.</b> PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL CRUDO	48
<b>TABLA 4.</b> CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO POR GRAVEDAD API	49
<b>TABLA 5.</b> TIPOS DE SUELO DE LA REGIÓN	54
<b>TABLA 6.</b> CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	62
<b>TABLA 7.</b> TPH EN DISEÑO DE EXPERIMENTOS	65
<b>TABLA 8.</b> COT EN DISEÑO DE EXPERIMENTOS	67
<b>TABLA 9.</b> % DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELO CERCANO AL OLEODUCTO	73
<b>TABLA 10.</b> % DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELO CIÉNAGA	73
<b>TABLA 11.</b> COSTOS GENERALES DEL PROYECTO	74
<b>TABLA 12.</b> ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	78
<b>TABLA 13.</b> PRESUPUESTO	82
<b>TABLA 14.</b> CARACTERÍSTICAS FINALES DE LAS ESPECIES DE ESTUDIO	88
<b>TABLA 15.</b> pH Y % HUMEDAD	91
<b>TABLA 16.</b> RESULTADOS TPH	92
<b>TABLA 17.</b> NORMATIVIDAD LOUISIANA 29B	93
<b>TABLA 18.</b> NORMATIVIDAD VS DATOS EXPERIMENTALES	93
<b>TABLA 19.</b> % REMEDIACIÓN TPH POR ESPECIE	95
<b>TABLA 20.</b> PROMEDIO DE REMEDIACIÓN POR ESPECIE	96
<b>TABLA 21.</b> COT	97
<b>TABLA 22.</b> PROMEDIO COT	98

## ABREVIATURAS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>°API</b>	Gravedad API
<b>BS&amp;W</b>	Contenido de agua y sedimentos que contiene el crudo
<b>COT</b>	Carbono orgánico total
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua.
<b>TPH</b>	Hidrocarburos totales de petróleo.
<b>K<sub>2</sub>CR<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	Dicromato de Potasio
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido sulfúrico
<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	Ácido Fosfórico
<b>C<sub>12</sub>H<sub>11</sub>N</b>	Difenilamina
<b>W</b>	Contenido de humedad expresado en %
<b>W<sub>w</sub></b>	Peso del agua existente en la masa de suelo
<b>W<sub>s</sub></b>	Peso de las partículas sólidas
<b>D</b>	Densidad aparente del suelo
<b>M</b>	Masa del contenedor con la muestra de suelo
<b>V</b>	Volumen del contenedor
<b>EDTA</b>	Sal disódica dihidrato
<b>HEDTA</b>	Ácido hidroxietilendiamino triacético
<b>HC</b>	Hidrocarburo

## RESUMEN

Actualmente uno de los problemas ambientales más importantes es la contaminación del suelo por derrames de hidrocarburos, que ocurren en actividades de explotación, perforación, producción, refinación, transporte o por actos violentos contra la infraestructura petrolera por parte de grupos al margen de la ley. Para dar solución a esta problemática, existen diferentes métodos convencionales de tratamiento para recuperar el ecosistema, como la aplicación de surfactantes, químicos e incluso la combustión. Sin embargo, en esta investigación se evaluó una técnica promisoriosa y poco usada en Colombia, como es la fitorremediación. No obstante, la selección de especies para ser usadas en esta técnica es clave para obtener resultados satisfactorios, por lo que en el presente trabajo se estudió la capacidad del pasto *Megathyrsus Maximus*, el girasol *Helianthus Annuus L* y El Trigo *Triticum Aestivum* en un suelo contaminado con petróleo mediano del Campo Velázquez de Mansarovar Energy ubicado en Puerto Boyacá para buscar la especie más eficiente, durante un periodo de experimentación de 3 meses, los cuales fueron evaluados a través de un diseño de experimentos de un factor en donde se tuvieron en cuenta parámetros descritos más adelante en suelos que contenían petróleo mediano y se trasplantó cada especie para su estudio pertinente. Sin embargo, es necesario el uso de técnicas de estimulación como lo son la adición de fertilizantes, sustratos, agua y demás.

La efectividad de la fitorremediación se determinó por medio de análisis del pH, porcentaje de humedad, Hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y Carbono orgánico total (COT). Al final del tiempo de experimentación, se lograron disminuir los porcentajes de TPH (Hidrocarburos totales de petróleo) en los dos tipos de suelos estudiados de manera que se logró demostrar que la fitorremediación con las especies estudiadas en el proyecto mejora el proceso de degradación de hidrocarburos en suelos.

**PALABRAS CLAVE:** Contaminación, derrame de petróleo, hidrocarburos de petróleo, biodegradación, fitorremediación, suelo agrícola, parámetro, Fitoextracción, degradación, *Helianthus Annuus*, *Triticum Aestivum*, *Megathyrsus Maximus*

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se han venido evidenciando innumerables desastres ambientales causados por los hidrocarburos, debido a que es una materia prima viscosa, pesada y con alta carga de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, lo que genera problemas en su tratamiento. A esto hay que sumarle que, en un país como Colombia, la mayoría de los daños ambientales derivados del petróleo emanan de una crisis social, junto con la desinformación de técnicas alternativas de remediación, que no generen impacto ambiental. Según las fuentes de Ecopetrol, para el año 2018, los atentados a los oleoductos generaron el derrame de 3,7 millones de barriles de crudo aproximadamente, acarreado así un costo en reparaciones cercano a los \$100.000 millones COP. [4]

Es pertinente resaltar que este problema se ha tratado de mitigar a lo largo de los años con el implemento de tratamientos que resultan poco efectivos, costosos, complicados y además no garantizan la recuperación del entorno. Aunque los surfactantes son una opción válida para el saneamiento de los suelos y los afluentes, hay que decir que estos tratamientos son de alto costo económico (como por ejemplo el EDTA- sal disódica dihidrato – la cual tiene un precio en euros de 59,28 por 500g y el HEDTA - ácido hidroxietilendiamino triacético- el cual tiene un valor de mercado de aproximadamente 200US por Kg, esto según la página alibaba.com) [5] y, por tanto, no son viables económicamente. Por otro lado, existe una solución con menor impacto económico, a corto plazo, pero que genera impactos negativos ambientales como la generación de gases de efecto invernadero, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, compuestos con alto potencial de afectación a la salud de las comunidades cercanas y pueden quedar trazas de estos en otros tipos de matrices ambientales como el agua y el suelo, dicha solución es la quema de los hidrocarburos.

En este punto es donde se ha visto una alternativa viable como lo es la biorremediación, específicamente la fitorremediación, debido a la facilidad con la que se implementa y la certeza de que se están usando materias netamente orgánicas para la recuperación del entorno. Esta técnica consiste en la aplicación de plantas u otros compuestos orgánicos como cascaras de cereales u hongos para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar y degradar los compuestos contaminantes

presentes en un entorno natural que afectan los suelos o los cuerpos de agua, atacando compuestos como metales pesados, radioactivos, orgánicos y derivados del petróleo, haciendo que en periodos determinados de tiempo los entornos se vayan recuperando, hasta llegar al punto en que se autorregulen, siendo este método una alternativa agradable con el ambiente a los métodos convencionales (Fisicoquímicos). [6]

Se sabe que la capacidad de la naturaleza de autorregularse es bastante alta esto basado en el principio de homeostasis según Mazparrote, S que la define como “la tendencia de los sistemas biológicos a adaptarse a las condiciones del medio externo y permanecer en estado de equilibrio interno”[7], pero en casos como los derrames de petróleo, la naturaleza no tiene la fuerza para regularse sola, de ahí la importancia de buscar alternativas verdes y de desarrollo sostenible, como lo es la fitorremediación , ya que esta técnica de recuperación no solo integra la parte ambiental, sino también el social y el económico, debido a que reduce costos de tratamiento y personal especializado, beneficia a los campesinos locales generándoles empleo y asimismo obteniendo la materia prima de ellos.

El concepto como tal de la aplicación de plantas en hidrocarburos es un tema de investigación relativamente joven, puesto que a lo largo del tiempo se han buscado tecnologías más agradables con el ambiente y bajas en costos. Ahora bien, es difícil hacer una comparación de costos, por lo que, conviene conocer las características de cada sitio en particular, pero en términos generales, se puede decir que es por lo menos diez veces más económica que la incineración y tres veces más económica que algunas tecnologías menos sofisticadas de remediación. [8] Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía; bajo costo de los nutrientes; y la operación en condiciones ambientales variadas.

Los derrames de petróleo en Colombia generan impacto en ríos, flora, fauna en donde cerca del 30% están asociados a sistemas de ciénagas (Como las ciénagas aledañas al campo Velásquez de Mansarovar en Puerto Boyacá), con afectaciones a nivel macro -como la mortalidad y la migración de especies nativas; el cambio abrupto del entorno y contaminación de afluentes, etc.- y a nivel micro -cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos y las afluentes- generando pérdidas tanto económicas como ambientales. [9]

En Colombia se han hecho múltiples estudios sobre la importancia de la fitorremediación, por ejemplo, «con lodos provenientes de plantas de tratamiento de vertimientos industriales en dos

especies vegetales, procedentes del humedal Santa María del Lago ubicado en la ciudad de Bogotá, con el fin de verificar la migración de contaminantes de interés sanitario tales como cianuro, fenol, zinc, níquel etc., hacia alguna zona de la planta. Para los ensayos de fitorremediación se utilizaron plantas acuáticas seleccionadas en cultivos in Vitro, adicionándoles cantidades conocidas de lodos con el fin de remover y contener los productos contaminantes presentes en él». [10]

Para los estudios de la fitorremediación se han utilizado múltiples especies vegetales, tales como el *Biden leavis* (botoncillo flora amarilla), la *Pteridium aquilinum* (Cytheatae), la *Lemna* (lenteja de agua), el *Scirpus californicus* (Junco), la subclase *Cyatheatae* (helecho), con la especie *Pteridium aquilinum* y *Typha 29 latifolia* (Tifa), entre otras, probándonos el potencial que puede tener esta técnica de remediación con diferentes tipos de plantas. (Martínez, Y. P., & Ayala, R. R. B. 2011). [10]

En este proyecto se estudiará la capacidad de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediano (22-29.9 °API, según PARIS DE FERRER, Magdalena. Fundamentos de ingeniería de yacimientos. Maracaibo, Venezuela.: 2009, p, 11.) por medio de 3 tipos de plantas: El pasto *Megathyrus maximus*, el girasol *Heliantbus annuus* l y el trigo *Triticum aestivum*, en donde se buscará disminuir la carga orgánica teniendo como factores evaluativos el carbono orgánico total (COT) y los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de la fitorremediación en suelos contaminados con petróleo mediano mediante el uso del pasto (*megathyrsus maximus*), el girasol (*heliantbus annuus l*) y el trigo (*triticum aestivum*) en el campo Velasquez de Mansarovar ubicado en Puerto Boyacá.

### 1.2 Objetivos específicos

Realizar una descripción teórica de las especies propuestas (pasto (*megathyrsus maximus*), el girasol (*Helianthus annuus l*) y el trigo (*triticum aestivum*)).

Caracterizar el suelo contaminado mediante un estudio de caso del sistema.

Determinar la especie más eficiente para el proceso de saneamiento por fitorremediación, destacándola de las demás especies estudiadas.

Determinar el costo de implementación de la propuesta trabajada.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 Marco teórico

Para el desarrollo de la investigación, se tendrán en cuenta los siguientes conceptos y antecedentes que servirán de modelo para el entendimiento del proyecto, pues darán soporte a la información presentada a lo largo del trabajo y por lo tanto le darán sentido a este.

#### 2.1.1 *Derrames*

Los derrames de petróleo a menudo son accidentes provocados cuando las personas cometen errores, los equipos están descompuestos, ocurren desastres naturales o por actos deliberados. Estos tienen importantes efectos ambientales y económicos, así como una posible afectación a la salud humana. Estos efectos pueden depender de qué tipo de petróleo se derramó y dónde ocurrió el desastre (en tierra, en un río o en el mar). Otros factores incluyen el tipo de exposición y la cantidad derramada.[11]

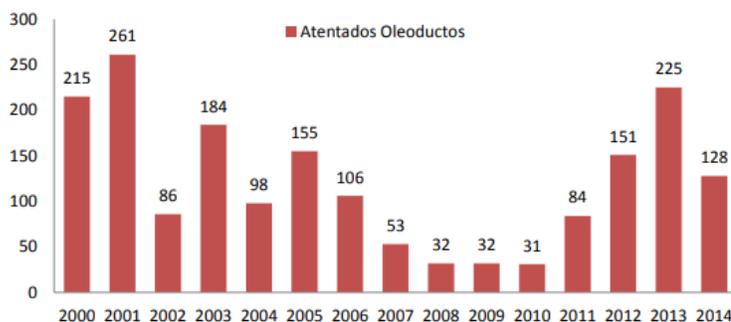
Los problemas causados por el crudo pueden incluir irritación cutánea y ocular, problemas neurológicos y respiratorios, y estrés. No se sabe mucho acerca de los efectos a largo plazo de estos derrames, pero las personas que limpian derrames están en mayor riesgo.[11]

#### 2.1.2 *Contaminación por hidrocarburos en Colombia*

Los derrames en Colombia se han presentado por diversas circunstancias como lo son de forma voluntaria, accidental o por atentados de grupos al margen de la ley. La **Figura 1** muestra algunos derrames causados por grupos al margen de la ley en el año 2015. Demostrando que en su gran mayoría los derrames de petróleo son generados por el intento de robar estos hidrocarburos, lo que genera daños irreparables en el medio ambiente y además aumentando los costes de remediación para las empresas involucradas. [12]

**Figura 1.**

*Historial de los ataques a los oleoductos en Colombia entre el 2000 y el 2014.*



**Nota.** Grafica que describe la cantidad de ataques a oleoductos desde el año 2000 hasta el año 2014. Tomado de: Tejada, L. 2015 “efectos del terrorismo en los oleoductos de Colombia”, Universidad Militar Nueva Granada, <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7789/EFECTOS%20DEL%20TERRORISMO%20EN%20LOS%20OLEODUCTOS%20DE%20COLOMBIA.pdf;jsessionid=A68004611E27B6EBF6254B207CE080D3?sequence=1>.

### **2.1.3 Derrames accidentales**

Son aquellos derrames que son generados por daños indirectos por la intervención humana, ya sea por corrosión, mala selección de la tubería, daños previos en los oleoductos o fugas.

Un ejemplo de ello fue lo sucedido en Puerto Boyacá en el sector de ‘Campo Moriche’ en febrero de 2021, en donde se presenta la unión de varios humedales, que confluyen en diferentes ríos y quebradas. En la Figura 2 se puede evidenciar como afecta esta problemática a los cuerpos de agua.

Igualmente, se registró 44 barriles de petróleo regados (según datos reportados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-), afectando la flora y fauna, como Chigüiros manchados y alimentados con agua totalmente contaminada con crudo, mientras la flora vive manchada de hidrocarburos. Por su parte, la ANLA respondió que, desde el 9 de diciembre del 2020, profesionales de la agencia verificaron lo que ha hecho la empresa petrolera, para subsanar la fuga de crudo advertida. [13]

## Figura 2.

Derrame en Puerto Boyacá



Nota: Derrame sucedido en la ciénaga del Palagua.

### **2.1.4 Derrames provocados-Ataques a oleoductos en Colombia**

Son aquellos derrames que están directamente relacionados a la intervención del ser humano, existe un gran historial de derrames a lo largo de la historia no solo de Colombia sino del mundo.

En Colombia hasta noviembre de 1998 se presentaron 920 ataques contra la infraestructura petrolera, 575 de ellos en el oleoducto Caño Limón-Coveñas, que mediante roturas y abolladuras han perjudicado ecosistemas, fuentes de producción y abastecimiento de las comunidades aledañas al oleoducto. Las áreas perjudicadas por los derrames de petróleo se ubican principalmente en la zona alta de la llanura araucana, en la región de la cuenca del río Catatumbo, en la llanura del valle medio y medio bajo del río Magdalena; departamentos de Santander, Cesar y Sucre, principalmente, y en los departamentos del Putumayo y Nariño. [12]

Entre los años 1986 y 2015 la empresa Ecopetrol S.A sufrió un total de 7 ataques a gran escala, en donde destacan el ataque al oleoducto Caño Limón-Coveñas en el año 1986, el cual fue dinamitado por la guerrilla del ELN, ocasionando el derrame de 45.743 barriles de petróleo, teniendo lugar esta catástrofe en el municipio de Carmen de Tonchalá (Norte de Santander) y el atentado contra

el oleoducto transandino en el año 2015, que tuvo lugar en el Tumaco (Nariño) causando el derrame de 10.000 barriles de crudo. (Fuente: Ecopetrol, ministerio de ambiente). [14]

Por otro lado, en lo transcurrido de los primeros meses del 2020 los oleoductos de Ecopetrol sufrieron 28 atentados causando no solo pérdidas económicas a la compañía sino también daños al medioambiente debido a las abolladuras y roturas de la tubería. Estos afectaron predios de terceros y a la quebrada Nembí que desemboca en el río Guisa. [15]

### **2.1.5 Biorremediación**

Es una tecnología que usa un elemento biológico, en la mayoría de los casos microorganismos, para eliminar contaminantes de un lugar, sea este suelo, sedimento, fango o mar. Esta tecnología se ha transformado en la colaboradora directa de la naturaleza, que no siempre es capaz de superar por sí sola grandes desequilibrios. La biorremediación le da una ayuda al medio ambiente en la mejora de los ecosistemas dañados, acelerando dichos procesos naturales. Lo que hacen los microorganismos es degradar los desechos en productos menos tóxicos, además de concentrar e inmovilizar sustancias tóxicas, metales pesados; minimizar desechos industriales y rehabilitar áreas afectadas con diversos contaminantes.[16]

2.1.5.a Bioventeo. Es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores. [17]

2.1.5.b Bioestimulación. Implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos in situ.[17]

2.1.5.c Bioaumentación. Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores.[17]

2.1.5.d Compostaje. El composteo es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso. Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas. [17]

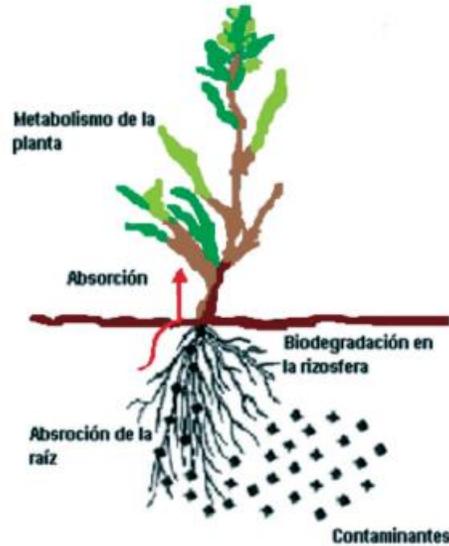
### ***2.1.6 Fitorremediación***

Para el proyecto la fitorremediación es de vital importancia, debido a que actualmente es una tecnología en desarrollo, que, si bien no es ampliamente usada, se tiene como una de las mejores alternativas para la remediación de suelos. La medición de la efectividad de este método bajo ciertas condiciones es uno de los objetivos de este proyecto, por lo que se hace necesario entender en qué consiste este método.

Se fundamenta en el uso de plantas y su microbiota asociada para remover, retener o reducir los contaminantes presentes en el ambiente y puede operar mediante diversos mecanismos que involucran distintas partes de las plantas. En la **figura 3** se puede observar el mecanismo de acción de la fitorremediación [15].

### Figura 3.

#### *Mecanismos de eliminación de contaminantes por la planta*



**Nota.** Descripción de las partes que están involucradas en la fitorremediación en una planta. **Tomado de:** S.B Mauricio, "Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos", Universidad libre- instituto de posgrado de ingeniería, No paginas 60, 2013

2.1.6.a Fitoextracción. Las plantas se cosechan para su posterior incineración, debido a que su uso puede ser peligroso. Este mecanismo incluye tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos que no cuenten con la capacidad de transformarse en sustancias no tóxicas. [19]

2.1.6.b Fitovolatilización. Se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con diversos tipos de contaminantes, algunos de estos pueden llegar a las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera. [19]

2.1.6.c Fitodegradación. Se encarga de transformar un contaminante en uno menos "perjudicial" para el medio ambiente, lo cual solo se puede presentar con contaminantes orgánicos.[19]

2.1.6.d Fitoimmobilización. Provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz-suelo-raíz los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de adsorción o precipitación. [19]

2.1.6.e Fitoestabilización. Se inmovilizan los contaminantes del suelo o el agua por medio de adsorción, precipitación y acumulación de sustancias en las raíces de las plantas. De igual forma este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire. (Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación) [19]

La fitorremediación se entiende actualmente como una de las posibles alternativas de remediación de suelos contaminados con petróleo, esto debido a que las tecnologías fisicoquímicas actuales que utilizan surfactantes presentan problemas fundamentales, tales como su elevado valor económico, además de que no garantizan la recuperación del ambiente. Al ser químicos fuertes, los surfactantes remueven el petróleo de la muestra contaminada, pero existe un grado de contaminación química que se genera como consecuencia.

### **2.1.7 Fitorremediación en Colombia**

En Colombia se han realizado diferentes estudios de fitorremediación, tanto *in situ*, como en condiciones de invernadero. En el departamento de Córdoba, se han realizado dos estudios en el cual, se han tomado diferentes muestras de raíz, tallo, y hojas de especies vegetales nativas en una zona de antecedentes mineros. Se identificaron 24 especies de plantas nativas y se analizaron la concentración de mercurio total, determinando los factores de bioacumulación y translocación de las raíces a brotes. Los resultados dados muestran en orden decreciente la bioacumulación de mercurio en la parte de la especie vegetal de la siguiente forma, raíces > tallos > hojas. [20]

### **2.1.8 Tecnologías de remediación fisicoquímicas**

Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. [21]

2.1.8.a Remediación Electrocinética (RE). La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo. [21]

2.1.8.b Extracción de vapores (EV). También conocida como ventilación del suelo, vaporización y volatilización, es una tecnología en la que se aplica un vacío al suelo, para inducir un flujo controlado y continuo de aire, y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo. La EV usualmente se lleva a cabo in situ. Sin embargo, en algunos casos, puede usarse como una tecnología ex situ. La efectividad del sistema de EV depende principalmente de la volatilidad de los contaminantes y de la permeabilidad y homogeneidad del suelo.[21]

2.1.8.c Solidificación / estabilización (S/E). La S/E es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido, y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes. La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica. [21]

### **2.1.9 TPH**

Los términos hidrocarburos totales de petróleo (abreviados TPH en inglés) se usan para describir una gran familia de varios cientos de compuestos químicos originados de petróleo crudo. El petróleo crudo es usado para manufacturar productos de petróleo, los que pueden contaminar el ambiente. [22]

El TPH es el concepto más importante que se trabajará a lo largo del proyecto, debido a que, proporciona una medida de la cantidad de hidrocarburos de petróleo presentes en una muestra de suelo, básicamente funcionando como una especie de indicador de qué tan contaminada está una muestra de suelo. Realizando una experimentación en donde se mida el TPH de un suelo cuando se generan cambios como los que llevan a cabo especies como el pasto *Megathyrus Maximus*, el girasol *Helianthus Annus* y el trigo *Triticum Aestivum*, las cuales son conocidas por su potencial

de fitorremediación, es fundamental para esta investigación puesto que al medir TPH antes y después de esta experimentación se puede determinar qué tan efectiva es cada una de estas especies.

La determinación de la efectividad por especie basados en TPH se da debido a que la cantidad de hidrocarburos de petróleo presentes en el suelo tenderá a disminuir en concentración cuando se lleva a cabo una remediación en el suelo, caso que no se debería evidenciar cuando no se lleva a cabo un proceso de remediación.

2.1.9.a Método Fluorimétrico. Se basa en la medición de la fluorescencia de productos petroleros después de una extracción de agua por hexano. La polaridad de las sustancias puede ser eliminada por tratamientos de extracción de TPH por medio de hexano, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio. [23]

2.1.9.b Cromatografía de gases. En cromatografía de gases la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil que es un gas inerte, y a diferencia de la mayoría de los tipos de cromatografía, la fase móvil no interacciona con las moléculas del analito; su única función es la de transportar el analito a través de la columna. A menudo la cromatografía de gases se emplea para confirmar de la presencia o ausencia de un compuesto en una muestra determinada. [23]

2.1.9.c Extracción gravimétrica de TPH. La extracción Soxhlet es una de las técnicas más eficientes en cuanto a la extracción de compuestos orgánicos semivolátiles y no volátiles en sólidos. la técnica se basa en el calentamiento y reflujo continuo del solvente de extracción a través de la muestra durante un tiempo prolongado. [24]

### ***2.1.10 Petróleos pesados***

Petróleo crudo con alta viscosidad (típicamente superior a 10 cp) y alta gravedad específica. La API clasifica los petróleos pesados como crudos con una gravedad inferior a 22° API. Si es mayor se considera liviano.

Además de alta viscosidad y gravedad específica, los petróleos generalmente presentan una relación hidrógeno-carbono baja, alto contenido de asfalto, azufre, nitrógeno y metales pesados, además de números ácidos elevados. [25]

### ***2.1.11 Diseño de experimentos***

Es una técnica que consiste en realizar una serie de experimentos en los que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso, de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

Con esta técnica se puede conseguir, mejorar el rendimiento de un proceso y reducir su variabilidad o los costos de producción. Su aplicación en la industria comprende campos como la Química, la Mecánica, los materiales, la Ingeniería Industrial o la Electrónica. [26]

## **2.2 Marco legal**

Para este proyecto se tendrán en cuenta las diferentes resoluciones, normas, leyes, decretos y normativas relacionadas con nuestro tema de interés, para un desarrollo efectivo y correcto con el cumplimiento de lo decretado por las autoridades y expertos

### ***2.2.1 Ley 46 de 1988***

Por la cual se crea el “sistema nacional para la prevención y atención de desastres”.

### ***2.2.2 Ley 99 de 1993***

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. En su artículo 49 consagró la obligatoriedad de la licencia ambiental para la ejecución de obras, el establecimiento de industrias o el desarrollo de cualquier actividad, que, de acuerdo con la ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje. Que así mismo, los artículos 50 y 51 de la citada ley consagraron que se entiende por licencia ambiental la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de una obra o actividad. [27]

### ***2.2.3 Ley 885 DE 2004***

Convenio internacional sobre cooperación, preparación y lucha contra la contaminación por hidrocarburos, 1990. Las Partes se comprometen, conjunta o individualmente, a tomar todas las medidas adecuadas, de conformidad con las disposiciones del presente convenio, para prepararse

y luchar contra sucesos de contaminación por hidrocarburos. Se establecen políticas sobre planes de emergencia, notificación, sistemas de lucha contra la contaminación, cooperación, manejo a nivel bilateral y multilateral de eventos por derrame de hidrocarburos. [28]

#### **2.2.4 Ley 1523 de 2012**

Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. [28]

#### **2.2.5 Decreto 919 de 1989**

Por el cual se organiza el sistema nacional para la prevención y atención de desastres de Colombia, creado por la ley 46 de 1988 y codifica todas las normas vigentes relativas a prevención y atención de desastres, incluida la ley en mención. [28]

#### **2.2.6 Decreto 2190 de 1995**

Por el cual se ordena la elaboración y desarrollo del plan nacional de contingencia contra derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas en aguas marinas, fluviales y lacustres. [28]

#### **2.2.7 Decreto 321 de 1999**

Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas [28]

#### **2.2.8 Decreto 1076 de 2015**

Es una compilación de las normas expedidas por el Gobierno Nacional en cabeza del presidente de la República, en ejercicio de las facultades reglamentarias otorgadas por el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política. La expedición de este decreto tuvo como primer paso la realización del inventario de decretos reglamentarios, el análisis de vigencias con el fin de no reproducir normas derogadas por disposiciones posteriores. Adicionalmente se actualizó la denominación de entidades, si a ello había lugar, atendiendo a las modificaciones institucionales que se han generado a lo largo de los años [29]

#### **2.2.9 Decreto 50 de 2018**

"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones" [30]

### ***2.2.10 Resolución 1209 de 2018***

Se adoptan términos para la elaboración de planes de contingencia para el manejo de derrames en desarrollo de las actividades de transporte de hidrocarburos, derivados o sustancias nocivas de la que trata el decreto 1076 de 2015 y se toman otras determinaciones [31]

### ***2.2.11 Resolución 1486 de 2018***

Estableció el formato único para el reporte de las contingencias para proyectos no licenciados. a través de dicho documento se reportarán las contingencias ambientales, por lo que debe ser aplicado por todas las personas naturales o jurídicas y autoridades ambientales que en el desarrollo de actividades no sujetas a licenciamiento presenten algún evento que ponga en riesgo los recursos naturales.[32]

### ***2.2.12 Lineamientos Plan de Contingencia - 2013***

Metodología para usar para contingencia de derrames de hidrocarburos.

### **3. METODOLOGÍA**

Con el fin de cumplir los objetivos planteados para el proyecto, se hizo una caracterización teórica de suelos y las materias primas empleadas para el desarrollo del proyecto, resaltando algunas características que influirán en gran medida en la parte experimental que se planteará más adelante.

Luego de hacer las investigaciones teóricas se procedió a realizar los sembradíos de las plantas estudiadas, bajo las condiciones requeridas para su crecimiento y posterior formación de rizosfera, acondicionando los suelos para los estudios y las pruebas de laboratorio, además de la contaminación de estos mismos con los petróleos a trabajar.

Posteriormente se realizó un diseño de experimentos con el fin de seguir la ruta de experimentación más conveniente para el desarrollo del proyecto, teniendo como punto de partida los parámetros del petróleo a trabajar, las características de los suelos previamente estudiados y las propiedades de las materias primas.

A partir de la información obtenida por las investigaciones y de la selección del diseño experimental más apropiado, se procedió a realizar la experimentación en los laboratorios de la Universidad de América, haciendo cálculos de pH, porosidad y porcentaje de humedad de los suelos problema, además de extracción gravimétrica de TPH planteada por los investigadores y realizada en el laboratorio IMA (Ingeniería Medio Ambiental), con el fin de calcular los hidrocarburos totales de petróleo presentes en los suelos que se fitorremediaron a lo largo de la duración del proyecto.

Asimismo, se realizará un estudio de costos básico para determinar la viabilidad del proyecto, teniendo en cuenta los tiempos de crecimiento de las plantas, el uso de recursos como el agua y el costo de las materias primas empleadas a lo largo del trabajo investigativo.

Finalmente, se procedió a determinar la especie más eficiente para fitorremediar entre las especies estudiadas, basándose en los costos de implementación, la cantidad de TPH, las condiciones de los suelos tratados y el tiempo de vida útil de cada especie según lo visto experimentalmente y unas pruebas finales desarrolladas en el laboratorio IMA (Ingeniería Medio Ambiental), con el fin de dar cumplimiento de los objetivos propuestos para el proyecto.

A continuación, pueden observar en la **Tabla 1**. Las fases establecidas para la consecución del proyecto:

**Tabla 1.**

*Fases seguidas para la consecución del proyecto.*

Fase	Objetivo	Actividad
Engranaje	Realizar una descripción teórica de las especies propuestas (pasto ( <i>megathyrus maximus</i> ), el girasol ( <i>Helianthus annuus l</i> ) y el trigo ( <i>triticum aestivum</i> )).	Investigación de las propiedades de las plantas estudiadas, resaltando las características más necesarias para la implementación del proyecto.
Explicación	Diseñar una caracterización teórica del suelo contaminado mediante un estudio de caso del sistema que se buscará alterar para su posterior tratamiento.	Mediante soporte bibliográfico hacer una caracterización del suelo a tratar, teniendo en cuenta las variables necesarias para estudiar a lo largo del proyecto.
Exploración	Formular un diseño de experimentos para el proyecto mediante las variables presentadas en el trabajo: TPH, suelos con y sin tratar con HC mediano, grado de contaminación y tiempo de crecimiento de la planta	Formular el método de experimentación del proyecto, mediante el estudio de las variables a trabajar y al tipo de diseño más viable para el trabajo.

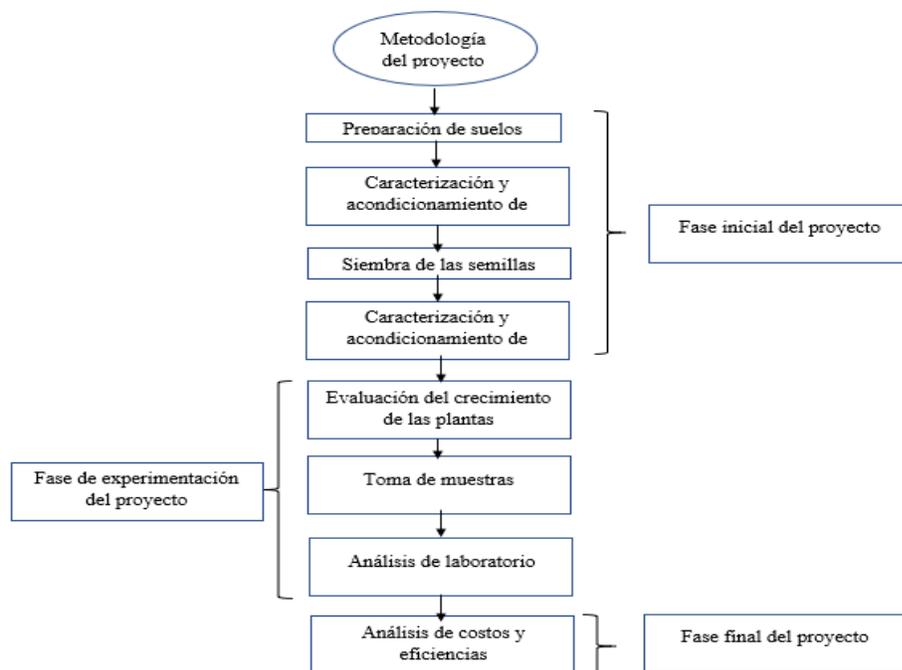
**Tabla 1 continuación**

Elaboración	Realizar pruebas de laboratorio para determinar la eficiencia de cada una de las especies estudiadas, en cuanto a su capacidad fitorremediativa	Desarrollar la experimentación requerida para soportar los datos del proyecto (TPH en suelos, capacidad fitorremediativa, etc.), dando solución a la situación problema inicial
Evaluación 1 De viabilidad económica	Determinar los costos de implementación de las propuestas trabajadas a lo largo del proyecto: Costos de materia prima, montaje de los cultivos experimentales, gastos de monitoreo y otros	Estudio de viabilidad económica del proyecto, teniendo en cuenta variables como costo de materias primas y tiempos de crecimiento de las plantas.
Evaluación 2 Capacidad fitorremediativa	Determinar la especie más eficiente para el proceso de saneamiento por fitorremediación, destacándola de las demás especies estudiadas.	Hacer un estudio del proyecto, evidenciando la planta con mayor capacidad fitorremediativa, basados en lo soportado por la experimentación previamente realizada.

**Nota.** Esta tabla muestra la metodología que sigue en cada fase por actividad propuesta.

**Figura 4.**

*Representación de la metodología global del proyecto*



*Nota.* La figura representa el paso a seguir del proyecto.

Como se puede apreciar en la **Figura 4**, el proyecto se dividirá en 3 fases principales, las cuales serán la fase inicial del proyecto que comprenderá la preparación de los suelos, las caracterizaciones y las siembras; La fase de experimentación del proyecto la cual comprenderá la experimentación con las muestras, evaluación y análisis de resultados; Finalmente se llegará a la fase final del proyecto, la cual comprenderá los análisis finales de costos y eficiencias de las materias primas trabajadas

### **3.1 Fase inicial**

#### **3.1.1 Acoplamiento de suelos**

1. Preparación del suelo: 2 semanas antes, se hace un pretratamiento del suelo para eliminar las impurezas (piedras, basura, componentes dañinos, etc.), además de hidratarlo con abundante agua, agregando sustrato y fertilizante, para preparar el caldo de cultivo para las plantas.
2. Contaminación del suelo con petróleo: Luego del acondicionamiento del suelo se tomarán las muestras a trabajar, en donde estas se contaminarán con petróleos medianos, evidenciando los cambios que presentan los suelos cuando estos son contaminados.

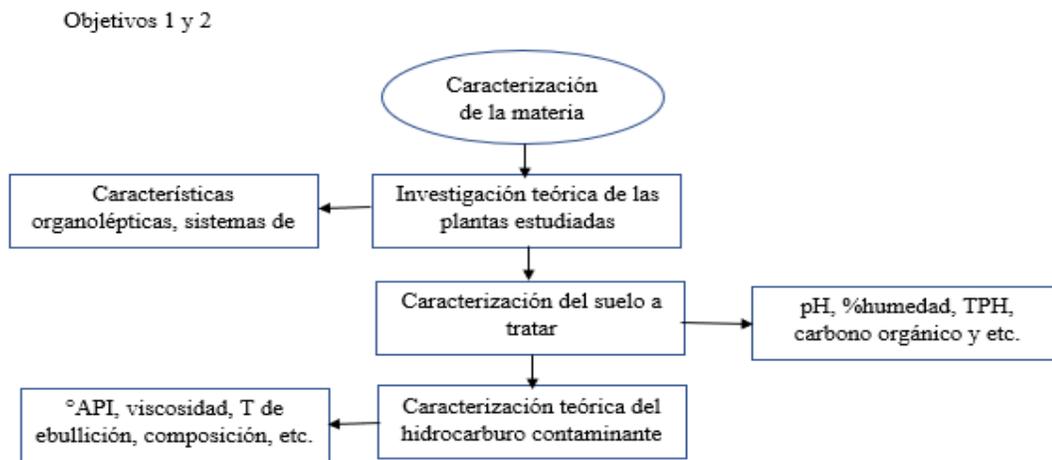
### 3.1.2 Caracterización bibliográfica de las especies estudiadas

Según la **Figura 5** está será la metodología seguir para la consecución de los objetivos 1 y 2:

1. Búsqueda de propiedades organolépticas de las especies: Se realizó una búsqueda bibliográfica de algunas propiedades organolépticas del pasto, trigo y girasol las cuales fueran de importancia para el proyecto.
2. Búsqueda de métodos de siembra: Se realizó una búsqueda bibliográfica para conocer los diferentes métodos de siembra de las especies, seleccionando posteriormente la que mejor se acoplara a los suelos estudiados y a las condiciones del lugar en donde se realizó el proyecto.
3. Estudio de condiciones de siembra y otras propiedades físicas: Con el fin de caracterizar de manera idónea las especies estudiadas además de realizar una buena siembra se realizó una búsqueda bibliográfica de las condiciones de siembra para cada especie estudiada además de otras propiedades como temperaturas, floración, humedad relativa teórica, etc.

**Figura 5.**

*Representación de la preparación del suelo*



*Nota.* La figura representa la metodología para la preparación y la caracterización del suelo a estudiar.

### 3.1.3 Siembra de las semillas

Después de la búsqueda bibliográfica de los métodos de siembra, así como la caracterización de las especies estudiadas se decidió seguir el método de siembra tradicional, el cual consiste en la realización de surcos en donde se agregaron las semillas junto con abono y sustrato.

Inicialmente se realizaron 3 surcos en donde en cada uno de ellos se agregaron semillas de cada especie con el mismo abono (Triple 15) y el mismo sustrato (cascara de arroz y gallinaza), a una profundidad aproximada de 5 a cm 6 en la tierra y con riego constante, cabe recalcar que para los girasoles se necesitó de un invernadero y por lo tanto puede existir una afectación en los resultados.

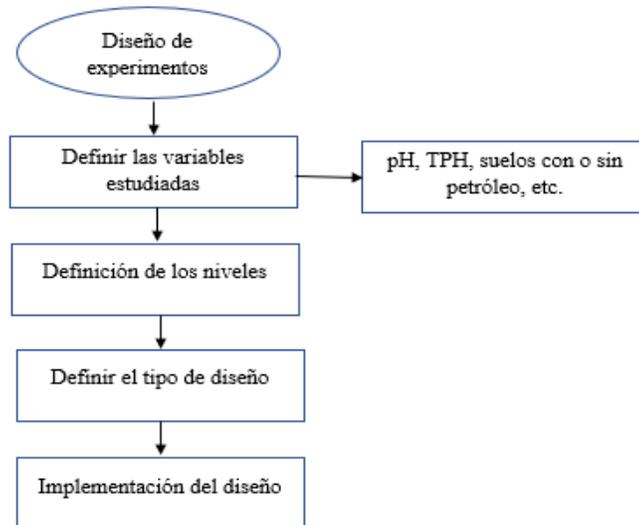
### 3.2 Fase experimentación

Para la experimentación se va a realizar un análisis del crecimiento de las plantas y unas pruebas iniciales y finales de laboratorio, como se puede evidenciar en la **Figura 6**:

**Figura 6.**

*Representación de la implementación del diseño experimental*

Objetivo 3



*Nota.* La figura representa la metodología para la siembra de las semillas.

#### 3.2.1 Observación del crecimiento de las plantas

Se realizó un seguimiento constante al crecimiento de las plantas con el fin de estudiar el tiempo de crecimiento de la rizosfera según los estudios bibliográficos previos (ya que la base del proyecto se ubica en el crecimiento de la rizosfera ya que ésta es la que realiza la fitorremediación).

Adicionalmente las plantas serán tratadas según sus caracterizaciones para riego (para el pasto de 2 a 3 veces al día, 3 veces a la semana y para el trigo 2 veces a la semana), adicionando la urea según especificaciones y la aplicación de fertilizantes constantemente.

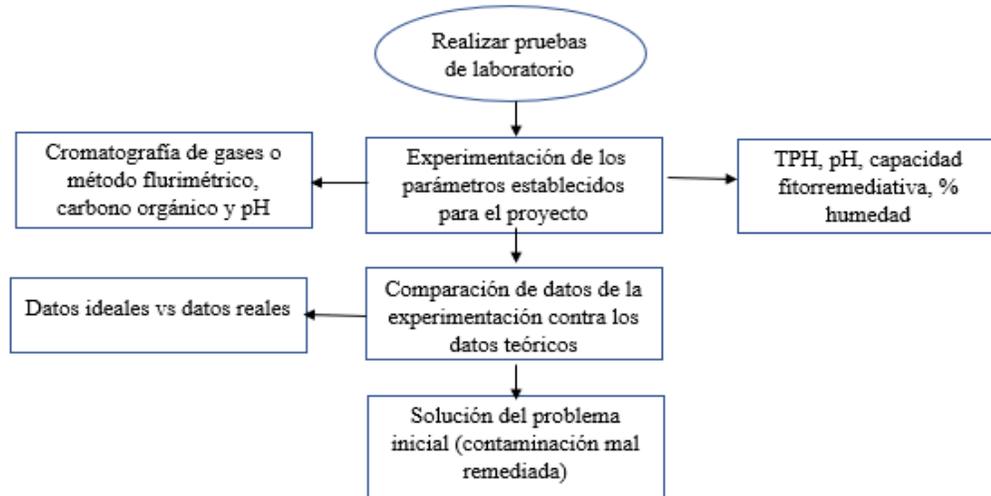
### 3.2.2 Toma de muestras

La toma de muestras se realizó en el campo Velásquez de Mansarovar ubicado en Puerto Boyacá en zonas en donde han existido derrames de petróleo a corto y largo plazo, la metodología de la toma de muestras fue a una profundidad de 20 cm bajo tierra y del suelo proveniente de una ciénaga contaminada con petróleo, las cuales después se contaminaron con petróleo del campo con el fin de acoplar las muestras para la posterior experimentación.

**Figura 7.**

*Representación de la parte experimental*

Objetivo 4



*Nota.* La figura representa la realización, observación y análisis de las pruebas de laboratorio.

### 3.2.3 Análisis de laboratorio

Según la **figura 7**, a cada muestra se le realizaron los análisis de concentración de TPH, carbono orgánico (COT), densidad aparente, porcentaje de humedad (%), pH y tiempos de fitorremediación (inicio del proyecto y final del proyecto), así como el crecimiento de cada planta.

3.2.3.a Carbono orgánico Total. Para el carbono orgánico se decidió seguir el método de Walckley-Black (del libro Métodos analíticos del laboratorio de suelos-Álvaro Fletcher-Dimas Malagón) el cual consiste en una titulación entre una solución de  $H_2SO_4$ ,  $H_3PO_4$  y  $K_2Cr_2O_7$  con un complejo ferroso (Clorhidrato de ortofenantrolina) usando como indicador difenilamina.

3.2.3.b Cálculo de la densidad Aparente. Se tomaron muestras suelo y se halló la diferencia entre la masa del contenedor y el volumen de este

3.2.3.c Cálculo del porcentaje de humedad. El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio es por medio del secado a horno a 100°C, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas

3.2.3.d TPH. Las muestras fueron analizadas mediante extracción Soxhlet y detección gravimétrica, de acuerdo con los métodos EPA 3540C (1996a) y 9071B (1998), respectivamente, utilizando tres disolventes de distinta polaridad y aplicando diferentes tiempos de extracción.

3.2.3.e Determinación del pH. Basados en investigaciones se llegó a la conclusión de plantear el procedimiento para calcular el pH en el suelo a tratar:

Se tomaron 20 gr de una muestra de tierra de cada suelo, previamente secada a unos 40°C durante varias horas y tamizada con un tamiz de 2mm luego añadiéndola a un vaso de precipitados con 50ml de agua destilada y se agitó durante 3 minutos para luego dejarla reposar durante 15 minutos y finalmente se realizó la medición del pH por pH-metro estandarizando la polaridad del suelo según bibliografía.

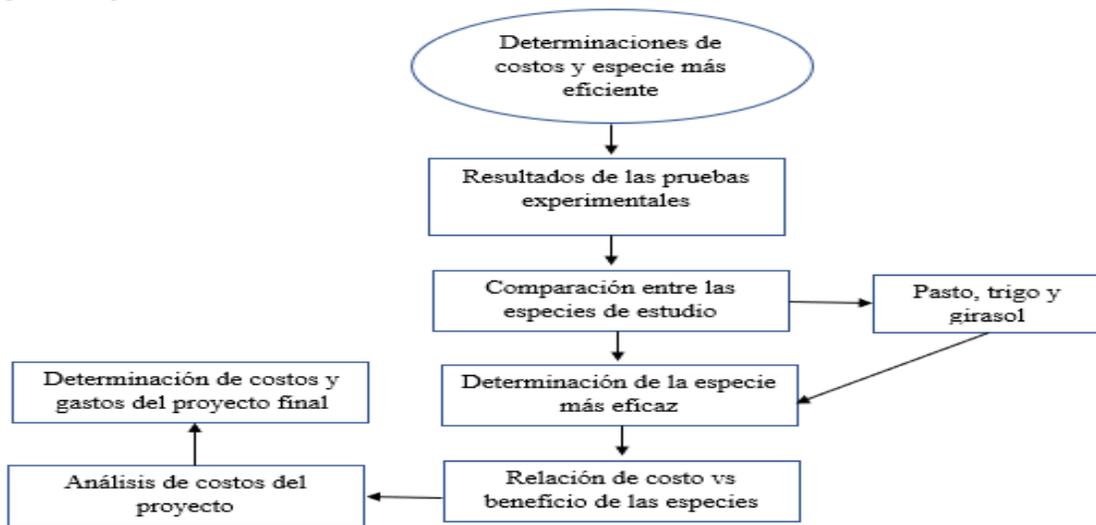
3.2.3.f Tiempos de fitorremediación. Para la determinación del tiempo de fitorremediación hubo una consulta bibliográfica previa y por lo tanto se tomó como punto de partida dicha consulta, se tomaron los tiempos iniciales (desde la siembra) y los tiempos finales (experimentación final).

### **3.3 Fase final**

Se determinó la especie más eficiente para fitorremediar entre las especies estudiadas, basándose en los costos de implementación, la cantidad de TPH, las condiciones de los suelos tratados y el tiempo de vida útil de cada especie según lo visto experimentalmente y unas pruebas finales realizadas. A continuación, la **Figura 8** resume la metodología final:

**Figura 8.** Representación del análisis de resultados

Objetivos 5 y 6



*Nota.* La figura representa el análisis de costos y resultados.

## 4. CARACTERIZACIÓN Y LABORATORIOS

Este capítulo es de tipo cuantitativa y cualitativo con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados. En primera medida se procedió a hacer una caracterización de las materias primas y del suelo que se va a estudiar. Luego del proceso anteriormente mencionado se continuo con el acondicionamiento del suelo (limpieza, selección, provisión y puesta en marcha de nutrientes), seguido por la siembra de las plantas de estudio, para posteriormente definir los niveles de cada variable a trabajar y por lo tanto la selección experimental. Por último, se realizará el análisis de laboratorio y de los resultados obtenidos.

### 4.1 Caracterización de las materias primas

#### 4.1.1 *Caracterización de las plantas*

Para el desarrollo de este proyecto se tendrán en cuenta ciertas características físicas, químicas y biológicas de cada especie estudiada, con el fin de obtener una mejor capacidad fitorremediativa, además de lograr una siembra en los tiempos establecidos o en el mejor de los casos en menores tiempos.

Para cada especie estudiada se realizarán estudios de distintos parámetros que afecten la siembra, con el fin de saber el entorno, características y taxonomía de cada tipo de planta con la que se realizará el proceso de experimentación, logrando un cultivo más idóneo. Es necesario resaltar las condiciones con las que las plantas crecerán, teniendo un conocimiento en el tiempo de germinación y las propiedades físicas de cada una de estas.

Los siguientes parámetros serán estudiados:

- Características físicas de la planta (altura, medida de hojas, color, etc).
- Área de cobertura de la planta.
- Tiempos de floración de la planta.
- Factores de riego.
- Temperatura, presión y humedad relativa del entorno.
- Sustratos y abonos que afecten el crecimiento de la planta.
- Características de siembra (distancia entre surcos, profundidad, etc).

**Tabla 2.**

## Caracterización de las plantas

Tipo de planta	Pasto <i>Megathyrsus Maximus</i>	Girasol <i>Heliantbus Annuus L</i>	Trigo <i>Triticum Aestivum</i>
Característica			
Altura (m)	0,85- 1,10	1 – 1,50	0, 85 – 1,5 m.
Medida de hojas (cm)	45 cm largo y 1,91 cm de ancho	Diámetro entre 2 – 6 cm, altura 40 cm	-----
Área de cobertura de terreno	35 – 70%	-----	-----
Floración	Entre los 18 - 20 días	Entre los 8-10 días	Entre los 7 – 14 días
Vida útil de la especie	4 meses	2 meses	4 meses
Recolección de semillas	Entre 20 – 28 días	Entre 15 – 30 días	Entre 45 – 60 días
Humedad relativa	81 %	Abundante agua, HR aprox del 11%	30%
Adaptación de suelos	Pastos de fácil adaptación en suelos entre 0 – 1800 msnm, con bastante fertilidad del suelo.	Arcillo-arenoso y rico en materia orgánica, baja salinidad. siembra en zonas húmedas con primaveras cálidas, suelos pesados y húmedos la profundidad de la siembra será entre 7 – 9 cm.	Suelos con bastante humedad, pero sin exceso (como mínimo el suelo debe de contener 30% de agua útil), suelos adecuados dos meses antes de la siembra. Método manual, suelos con humedades altas, profundidad de siembra no mayor a 4 cm.

**Continuación Tabla 2.**

Temperaturas (rango)	20 – 30°C	10 – 29 °C	20 – 25°C.
Fertilización	Urea (Razón de 1 kg por cada 30 m2), gallinaza, Estiércol de cerdo y cascara de arroz	Estiércol de aves de corral (gallinaza), Urea (Razón de 1 kg por cada 30 m2), estiércol de cerdo y cascara de arroz.	Gallinaza, Urea (Razón de 250 g a 1 kg por planta según su tamaño) y estiércol de cerdo y cascara de arroz
Sustratos	Aserrín, Tusa de mazorca	Aserrín, tuza de mazorca.	Aserrín y Tusa de mazorca
Riego	Profundidad de mínimo 20 mm, estudio de la tierra 15 – 30 minutos después de iniciar el riego, esto con el fin de estudiar si el riego es efectivo. Riego entre 2 o 3 veces al día, implementando una manguera como sistema de riego.	Abundante agua, manguera como sistema de riego. Mantener 25 – 30 días con bastante agua.	Riego abundante antes de la siembra, riego moderado cuando la planta empiece a brotar y cuando empiece a formarse la caña. Evitar el exceso de agua, uso de manguera como sistema de riego. (Dos veces a la semana).
Exposición solar	Moderada	Normal	Alta
Otros		Cantidad de hojas: Entre 12 – 40 Distancia entre surcos: Entre 80 – 100 cm.	Numero de hojas: Entre 4 – 6 hojas. Distancia entre surcos: Entre 80 – 100 cm.

**Nota:** En esta tabla se hace una breve descripción de las características físicas y taxonómicas de los tipos de plantas estudiadas.

4.1.1.a Fisiología vegetal. Es el estudio de los procesos de germinación, crecimiento, desarrollo, maduración, reproducción y muerte de las plantas. También se ocupa de los factores climáticos del medio y de las interacciones de las plantas con los organismos relacionados con ellas, en cuanto dichos organismos influyan y modifiquen el curso del desarrollo vegetal.[33]

#### 4.1.1.a.i Girasol

a) El girasol se caracteriza por un potencial fotosintético muy elevado, sobre todo en las hojas jóvenes, pero también posee altas tasas de foto-respiración (pérdidas de sustratos carbonados) y de transpiración (pérdida de agua). [34]

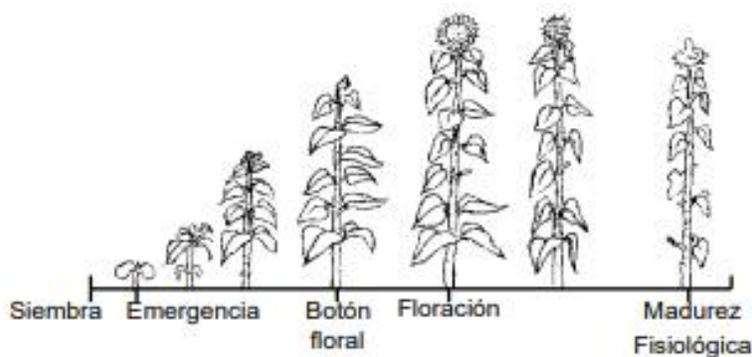
b) Alcanza igualmente tasas de crecimiento muy elevadas, es sensible a las altas temperaturas durante el crecimiento y presenta un nivel de saturación lumínica muy alto. Todo ello compone un comportamiento fisiológico próximo al de las plantas de metabolismo C-4, como el maíz y el sorgo [34]

#### C) ciclo de vida

Comienza el ciclo con la siembra y el estado reproductivo, en donde surge la aparición de la inflorescencia o botón floral, continua con la floración hasta terminar con la madurez fisiológica.

### Figura 9.

#### *Ciclo de vida del girasol*



**Nota.** Descripción del ciclo de vida del girasol. Tomado de: L. A. N. Aguirrezábal *et al*, *Girasol: Aspectos Fisiológicos Que Determinan El Rendimiento*. Buenos Aires, Argentina: Unidad Integrada Balcarce, 2001.

En la inflorescencia comienza a abrirse y las flores liguladas comienzan a verse.

Para la floración, en la inflorescencia o capítulo del girasol (es un receptáculo circular) se asientan dos tipos de flores distintas: las liguladas y las tubulares; Las flores liguladas están situadas en el borde del capítulo, son de color amarillo y no producen semillas. Su función es atraer a los insectos polinizadores. Mientras las flores tubulares son las que tiene los órganos de reproducción tanto

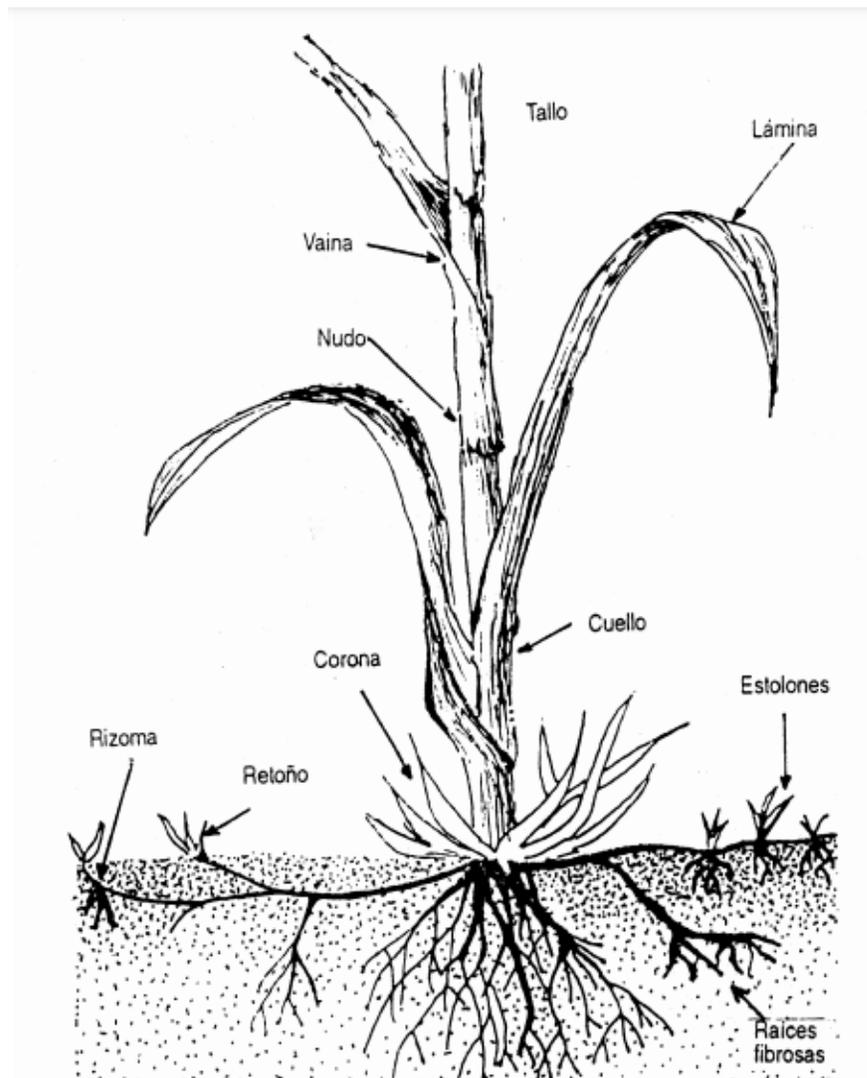
masculinos como femeninos. Están dispuestas en arcos espirales que parten del centro del capítulo.[35]

Para finalizar, se produce la síntesis y acumulación en la semilla de los ácidos grasos que determinarán el contenido graso total de la cosecha. [35]

#### 4.1.1.a.ii Pasto

### Figura 10.

#### *Ciclo vida pasto*



**Nota.** Descripción de las partes que componen al pasto. Tomado de: M. C. Domingo *et al*, "MANEJO DE PASTO Facultad de Ciencia Animal Managua, Nicaragua." *Universidad Nacional Agraria*, 2005. Available: <https://cenida.una.edu.ni/textos/nf01u58mp.pdf>.

- a) Son plantas que se han especializado para su adaptación al frío, al calor, viento, sequía, a la humedad, a las variaciones físicas y químicas del suelo, constituyendo la vegetación dominante en valles, sábanas, estepas, costas y laderas. [36]
- b) El pasto Guinea, originario de África, es una gramínea que se encuentra en zonas tropicales y subtropicales. Se caracteriza por ser apomíctica y predominan las formas tetraploides. Se presenta una amplia diversidad genética en esta especie. Por la forma en que rebrota, por el tamaño de la lámina foliar y la relación hoja: tallo, es una especie que puede producir una cantidad considerable de biomasa palatable. [37]
- c) Las condiciones climáticas y la edad de rebrote afectan las características nutricionales de este tipo de gramínea. Además, la frecuencia y altura de corte influyen en la estructura del dosel de una pradera y afectan la relación hoja: tallo, tasa de crecimiento, población de tallos, tasa de expansión foliar y la remoción de meristemos apicales [37]
- d) Ciclo

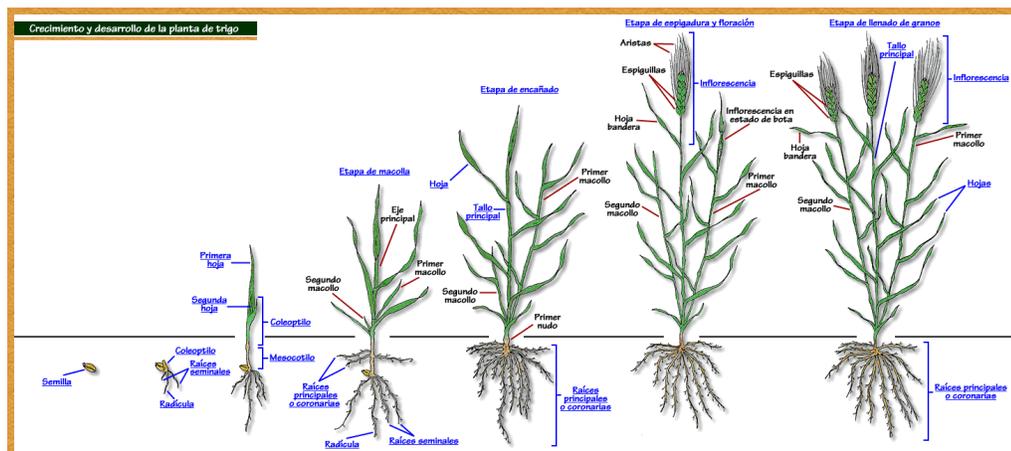
La inflorescencia se desarrolla en forma de panaja abierta con longitud de 12 a 40 cm con espigas. Su flor interior es la masculina, mientras la superior la hermafrodita

La producción de semillas se hace todo el año y con buenos rendimientos a altas temperaturas y bajas precipitaciones (mayor a 27°C y menor a 800 mm/año) [38]

#### 4.1.1.a.iii Trigo

**Figura 11.**

*Ciclo de vida del trigo*



**Nota.** Descripción del ciclo de vida del trigo. Tomado de: SECICO, "Biología de cultivos anuales", Pontificia Universidad Católica de Chile. Available: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/cultivos/cereales/trigo.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/trigo.htm).

- a) Las raíces que se desarrollan durante la etapa de germinación las cuales corresponden a la radícula y a las raíces “seminales”. Este sistema primario de raíces deja de crecer luego que las plantas alcanzan el estado de tres a cuatro hojas, perdiendo importancia en forma gradual hasta terminar por desaparecer. [39]
- b) Luego empiezan a salir las raíces principales a partir del estado de 4 hojas, las cuales se concentran en los primero 20 a 30 cm llegando a un máximo de 1 m de longitud en condiciones favorables. [39]
- c) Siguiendo al proceso de crecimiento de raíz sigue la estructura llamada Coleóptilo el cual emerge desde la semilla hacia arriba y se aproxima a la superficie del suelo. [39]
- d) Otra parte del trigo es la que recibe el nombre de Mesocotilo el cual es una estructura tubular de color blanco y semejante a un tallo, aparece inmediatamente a continuación del coleóptilo, una vez que éste rompe la cubierta seminal. La elongación del mesocotilo, a partir de la semilla, permite dejar a la plántula a una distancia de 1,0 a 2,5 cm de la superficie del suelo. [39]
- e) El tallo es una de las partes fundamentales de la caracterización del trigo, este puede alcanzar una altura entre 0,5 y 1,5m, es hueco, tiene forma cilíndrica y termina en una espiga. [39]
- f) Siguiendo al tallo se tienen las hojas, las cuales se componen de dos partes: una hendidura longitudinal que envuelve el tallo y una lámina relativamente larga y angosta, dependiendo de la hoja se tienen longitudes de 2-3 cm en la parte media y alta de cada tallo y hojas de longitudes entre 25 y 30 cm. [39]
- g) Etapa de Mancolla: Esto se da cuando se producen brotes secundarios llamados macollos, iniciando su aparición cuando las plantas presentan entre dos y tres hojas. Dependiendo de las condiciones de cultivo, pueden originarse varios macollos; éstos, luego de desplegar las primeras hojas, generan su propio sistema de raíces adventicias hasta el punto de comportarse como una planta individual. El número de Mancollos puede variar entre 1 y 5 en la planta, Sin embargo, lo normal es que un 30 a 50% de los macollos sea poco productivo, o improductivo; esto ocurre principalmente en los macollos de formación más tardía, los cuales, por quedar relegados bajo la vegetación producen espigas pequeñas; éstas en muchos casos no completan su madurez. [39]
- h) Etapa de encañado: Esta comienza cuando aparece una pequeña protuberancia en la parte subterránea, en esta etapa las plantas tienden a un crecimiento vertical, y no angulado como lo fue durante la etapa de macolla. La etapa de encañado finaliza cuando el último nudo en la parte alta de la planta, que corresponde al primero que aparece sobre el suelo, da paso a la espiga a través de la vaina de la hoja bandera u hoja superior. [39]

- i) Etapa de espigadura y floración: La espiga comienza a aparecer a través de la vaina de la hoja bandera u hoja superior; esta etapa se denomina comúnmente desembuchado de la espiga o estado de bota. Una vez que la espiga está completamente expresada en el extremo del tallo, se considera finalizada la etapa de espigadura. Sólo a partir de ese momento y en forma relativamente rápida, comienza la floración, fase que dura entre 1 y 2 semanas como promedio. La etapa de floración se considera terminada cuando todos los estambres de una espiga se hacen visibles asomándose a través de las espiguillas. [39]
- j) Etapa de llenado de granos: Se extiende desde que ocurre la fecundación hasta el momento en que se alcanza la madurez fisiológica, con aproximadamente 35% de humedad en los granos. Los granos inicialmente presentan un contenido acuoso; posteriormente, al ir madurando, pasan sucesivamente por los siguientes estados: lechoso, masa blanda, masa dura (madurez fisiológica), grano duro y madurez de cosecha. La duración de la etapa de llenado de granos presenta, en general, una correlación positiva con el rendimiento. [39]
- k) Semillas: La forma de la semilla es ovoide, algo aplastada en un extremo y provista de pilosidades cortas en el otro, siendo acanalada en toda su longitud. [39]

#### 4.1.2 Caracterización del crudo

Se va a realizar una caracterización del tipo de crudo en cuanto a su gravedad API, % de azufre, número ácido y viscosidad según los datos de la **Figura 12.** de Mansarovar Energy.

#### **Figura 12.**

*Matriz de evaluación del crudo campos Mansarovar Energy*

Matriz de Evacuación de Petróleo									
ESPECIFICACIONES DE CALIDAD	Velásquez	Jazmín	Girasol	Abarco	Moriche	Nare Sur	Underriver	Diluent/Naphtha	Blend
API	22	11	11	10	14	12	11	77	19
AZUFRE(%)	1.00	1.54	1.59	1.58	1.36	1.53	1.59	0.01	1.32
Numero Acido(mgkoh/kg)	3.13	7.42	7.51	8.17	7.31	7.20	7.82	-	6.54
Viscosidad (cstk/40° c)	65	11.632	9.098	10.241	1.539	8.937	8.654	0.41	141

*Nota. Esta imagen muestra la caracterización del crudo de campo Velásquez. Tomado de Mansarovar Energy. (s.f). «Transporte,» Mansarovar Energy, [En línea]. <https://www.mansarovar.com.co/transporte/>.*

Si se quiere tener mayor precisión acerca del crudo se pueden realizar pruebas experimentales mostradas en la **Tabla 3.**

**Tabla 3.**

Pruebas experimentales del crudo

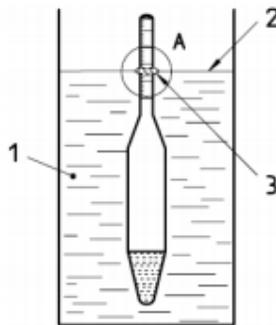
Parámetros experimentales del crudo	Norma
Gravedad API	ASTM D287
Salinidad	ASTM D 3230
Parafinas y Asfáltenos	ASTM D 2007
BSW	ASTM D 4007

**Nota:** En esta tabla se hace una referencia a las pruebas que se pueden realizar para determinar las propiedades del crudo.

4.1.2.a API. Es una escala de gravedad específica para medir la densidad relativa de los crudos desarrollada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute, API). La gravedad API está graduada en grados en un instrumento de hidrómetro [40]

**Figura 13.**

*Representación de un hidrómetro para determinar API*



**Nota.** La figura representa el procedimiento para determinar la gravedad API. **Fuente:** ASTM D-1298 -99 (Reaprobada 2005) Método de Prueba Estándar para Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), o Gravedad API del Petróleo y Productos Líquidos de Petróleo por el Método del Hidrómetro Manual de Normas de Medición de Petróleos (MPMS), Capítulo 9.1 1

**Ecuación 1. Determinación gravedad API**

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{G.E. (60^{\circ}F/60^{\circ}F)} - 131,5$$

**Nota:** Ecuación para calcular gravedad API.

Donde: GE es la gravedad específica del fluido.

**Tabla 4.**

*Caracterización del crudo por gravedad API*

Tipo de crudo	° API
Extra Pesados	<9,9
Pesados	10 – 21,9
Medianos	22- 29,9
Livianos	>30

**Nota.** Esta tabla muestra la caracterización de la gravedad API. Tomado de PARIS DE FERRER, Magdalena. Fundamentos de ingeniería de yacimientos. Maracaibo, Venezuela.: 2009, p, 11.

Según la **Tabla 4** el crudo que se va a utilizar se puede clasificar como **Mediano** por estar en los límites de la clasificación API (Instituto Americano del Petróleo). Cuantos más grados API tenga un petróleo, menos refinación se requiere para obtener de él los productos más costosos, que son los llamados “blancos”, entre ellos la gasolina.[41]

Un crudo que tiene características pesadas dificulta su extracción, manejo y transporte debido a sus propiedades fisicoquímicas, principalmente su alta densidad y viscosidad, baja gravedad API, y alto contenido de hidrocarburos pesados. Por lo general tienen un gran porcentaje de componentes pesados como resinas, asfáltenos, sales, ácidos orgánicos, residuos de carbono, sulfuros, metales y contenido de nitrógeno los cuales reducen la gravedad API° y

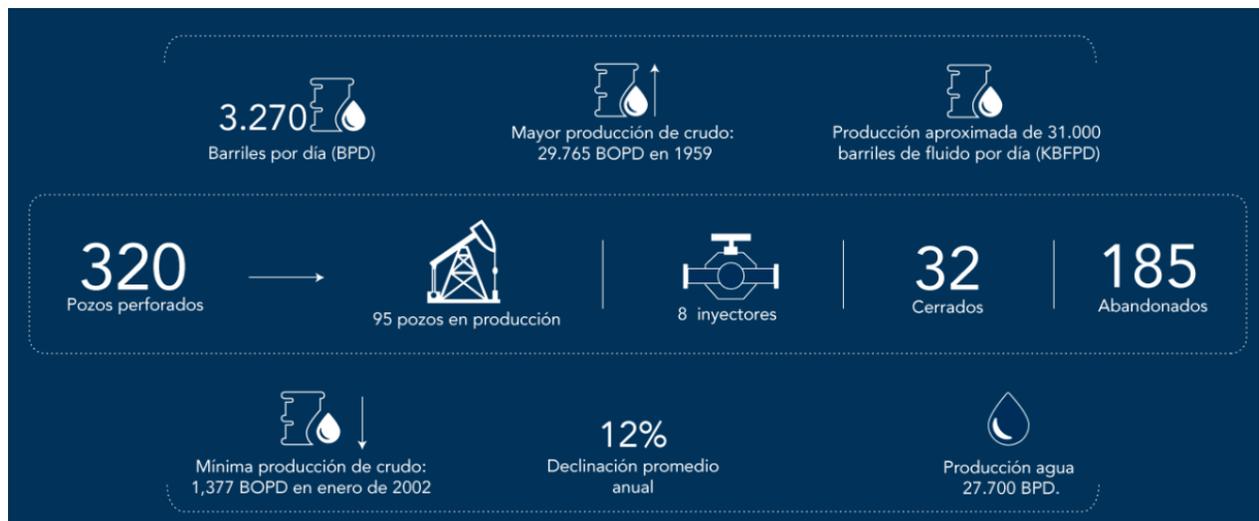
aumentan drásticamente la viscosidad del crudo conllevando a mayores exigencias por parte de los equipos y dispositivos que inciden en su desplazamiento. [42] [43] Además forjan inconvenientes en las líneas de flujo e instalaciones de superficie, ya que su estabilidad puede ser vulnerada principalmente a cambios de presiones de flujo, originando obstrucciones en las líneas y reduciendo la eficiencia de los elementos que condicionan su transporte, promoviendo el uso de métodos y tratamientos especiales como: Calentamiento, coreannular flow, dispersión, dilución, entre otros (Guevara E., 1997) [43]

Otra clasificación más detallada se hace mediante el valor de la viscosidad (Wally J., 2012), siendo esta una propiedad del fluido que mide la resistencia que tiene el fluido a fluir. Consecuentemente, el crudo extrapesado tiene viscosidades entre 10000 cP a 100 cP, mientras que los crudos medianos a pesado tienen viscosidades entre 100 cP a 10 cP, lo cual ayuda a diferenciar crudos de bitúmenes.[43] Además, el transporte de crudo por los oleoductos en Colombia requiere, que la viscosidad no supere 300 Centistokes a temperatura ambiente y la gravedad API mínima sea de 18°. [44]

4.1.2.b Selección de muestras de Petróleo. Basado en estos datos, se denota que trabajar petróleos pesados para esta investigación, generaría una gran cantidad de inconvenientes en la manipulación y análisis de muestras de petróleo y, por ende, la determinación de fitorremediación, también se haría más complicada. En consecuencia, este proyecto decidió trabajar con petróleo mediano, debido a que el campo Velasquez de Mansarovar Energy trabaja específicamente con petróleos de características que acorde a la teoría, se clasifican como petróleos medianos. Además, se decidió trabajar con este tipo de petróleo ya que, al realizar la revisión bibliográfica de los antecedentes, una gran cantidad de investigaciones se llevan a cabo con este mismo tipo de petróleo.

4.1.2.c Otras características del crudo y campo. En la **Figura 14**. Se pueden observar características de producción, del campo y los pozos perforados.

**Figura 14.** Datos interés Campo Velásquez



**Nota.** Esta imagen muestra las características básicas del campo. Tomado de. Mansarovar Energy. (s.f).«Activos- Campo Velasquez,» Mansarovar Energy, [En línea]. <https://www.mansarovar.com.co/campo-velasquez/>.

#### 4.1.3 Caracterización del suelo

Para la clasificación de los suelos se tuvieron en cuenta los parámetros taxonómicos descritos a continuación:

#### Figura 15.

##### *Parámetros taxonómicos del suelo*

- Letras empleadas para el paisaje:

M= Montaña

A= Altiplanicie

L= Lomerío

V= Valle

- Letras empleadas para el clima:

A= Nival

B= Subnival pluvial

E= Extremadamente frío húmedo y muy húmedo

G= Muy frío muy húmedo

H= Muy Frío húmedo

J= Frío pluvial

K= Frío muy húmedo

L= Frío húmedo

M= Frío seco

O= Medio pluvial

P= Medio muy húmedo

R= Medio seco

V= Cálido húmedo

- Letras empleadas para las fases de pendiente:
  - a. Pendiente 0-3% Topografía plana, plano – cóncava.
  - b. Pendiente 3-7% Topografía ligeramente inclinada y ligeramente ondulada.
  - c. Pendiente 7-12% Topografía moderadamente inclinada, ligeramente quebrada y moderadamente ondulada.
  - d. Pendiente 12-25% Topografía fuertemente inclinada, moderadamente quebrada y fuertemente ondulada.
  - e. Pendiente 25-50% Topografía ligeramente empinada, fuertemente quebrada y ligeramente escarpada.
  - f. Pendiente 50-75% Topografía moderadamente empinada y moderadamente escarpada.
  - g. Pendiente > del 75% Topografía fuertemente empinada y fuertemente escarpada.
- Números arábigos empleados para fases de erosión:
  - 1= Grado de erosión ligero.
  - 2= Grado de erosión moderado
  - 3= Grado de erosión severo.

- Letras empleadas para las fases por pedregosidad:

P = Pedregosidad

Letras empleadas para las fases por inundabilidad o encharcamiento:

x= Inundables o encharcables.

Un ejemplo que podemos ver de cómo se define la taxonomía de un suelo se define a continuación:

Basados en los parámetros anteriormente descritos de tiene una taxonomía VVCa. Esta taxonomía quiere definir los siguientes parámetros:

V= Paisaje de Valle.

V= Clima cálido, húmedo.

C= Asociación Chromic Endoaquerts – Hidric Sphagnofibrists.

a = Pendiente 0-1%. Topografía plano-cóncava.

*Nota.* Esta descripción muestra los Parámetros de selección del suelo tomado de “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá D.C, 2005.  
<http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>

Según la **Figura 15**, se cree que los suelos obtenidos para el desarrollo del proyecto tienen la secuencia taxonómica evidenciada en la **Tabla 5** en donde se pueden apreciar los datos de paisaje en donde fue tomado el suelo, el clima en que se encuentra la zona de toma de muestras, el tipo de lugar en donde fueron tomadas las muestras (pendiente), las tendencias a inundarse o encharcamiento del suelo (posibilidad de aumentar porcentajes (%) de humedad y el tipo de asociación/complejo al que está sujeto el suelo estudiado. Cabe recalcar que la asociación será explicada en el siguiente inciso. Los parámetros anteriormente descritos son importantes debido a que denotan las condiciones en las que se encontraron los suelos y principalmente ayuda a saber qué tipo de suelos fueron tomados y cuáles son sus características.

**Tabla 5.***Tipos de suelo de la región*

<b>Nombre</b>	<b>Taxonomía</b>	<b>Paisaje</b>	<b>CLIMA</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Pedrosidad/inundabilidad o encharcamiento</b>	<b>Asociación / complejo</b>
SUELO 1	VVAax	Valle	Cálido húmedo	Topografía plana - cóncava	Inundables o encharcables (x)	Complejo Aerico Fluvaquents – Misceláneo Arenoso
SUELO 2	VVBa	Valle	Cálido húmedo	Topografía plana – cóncava	-	Asociación Fluventic Eutrudepts – Typic Udorthents - Epiquents
SUELO 3	VVCa	Valle	Cálido húmedo	Topografía plana – cóncava	-	Asociación Chromic Endoaquents – Hidric Sphagnofibrists
SUELO 4	VVDA1	Valle	Cálido húmedo	Topografía plana - cóncava	-	Consociación Oxic Dystrudepts.

**Nota.** Esta tabla muestra los Parámetros de selección del suelo tomado de “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá D.C, 2005.  
<http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>

Para definir el tipo de suelo según la taxonomía, se tienen datos llamados asociación/complejo los cuales definen las características principales para tener en cuenta de los suelos, la descripción de cada una de estas se describe a continuación:

4.1.3.a. SUELO 1: Complejo Aerico Fluvaquents – Misceláneo Arenoso. Topografía ligeramente plana (pendientes del 1 – 3%), terreno compuesto por suelos Aerico Fluvaquents 60%, Tierra misceláneo de arena 30% y suelos Fluvaquentic Eutrudepts 10%. Los suelos Aerico Fluvaquents son de color gris oscuro en algunos casos presentando colores rojizos y textura franco-arenosa o arcillo limosas, son suelos moderadamente profundos y con baja permeabilidad, tendencia a la alcalinidad y fertilidad natural alta.

Los suelos Fluvaquentic Eutrudepts presentan un color gris oscuro amarillento con manchas rojizas con textura franco-limosa y franco-arenosa son suelos moderadamente profundos y con baja permeabilidad, tendencia a la alcalinidad y fertilidad natural alta.

Los suelos del complejo Aerico Fluvaquents – Misceláneo Arenoso son suelos ricos en azufre y adaptables para cultivos comerciales.

**Figura 16.**

Suelo tipo Aerico Fluvaquentic.



**Nota.** Posible imagen que describe el suelo del tipo Aerico Fluvaquentic. Tomado de: “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá d.c, 2005. <http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>

4.1.3.b. SUELO 2- Asociación Fluventic Eutrudepts – Typic Udorthents – Epiaquents. Topografía ligeramente plana (pendientes del 1 – 3%) donde existen cultivos como pastos naturales, terreno compuesto por suelos Fluventic Eutrudepts 40%, Typic Udorthents 30%, Typic Epiaquents 20% e inclusiones de Chromic Hapluderts y Fibric Haplohemists 10%.

Los suelos Fluventic Eutrudepts son de color gris oscuro con manchas pardas rojizas, aunque también puede ser gris claro y con textura franco-arenosa y arcillosa (contenido de arcillas mayor al 60%), presentan buena permeabilidad y tendencia a comportamiento ácido y fertilidad natural alta.

Los suelos Typic Udorthents son de color pardo grisáceo oscuro o pardo rojizo y con texturas variadas como franco-arenosa, franco-arcillosa, arenosa-gravilosa y arcillo-arenosa, con buena permeabilidad, tendencia a la acidez y fertilidad natural baja.

Los suelos Typic Epiaquents son de color pardo amarillento o gris oscuro rojizo con manchas pardo-grisáceas y texturas franco-arcillosa y franca, con baja permeabilidad, tendencia a la basicidad y fertilidad natural alta.

Los suelos Chromic Hapluderts son de color gris oscuro con manchas rojizas oscuras o pardas y con textura arcillosa, con buena permeabilidad, son neutros, aunque pueden tener una breve tendencia a la alcalinidad y fertilidad natural alta.

Los suelos Fibric Haplohemists son de color gris muy oscuro o negros y con textura de material vegetal poco o moderadamente descompuesto, con baja permeabilidad, tendencia a la acidez alta y fertilidad natural baja.

Los suelos de la Asociación Fluventic Eutrudepts – Typic Udorthents – Epiaquents presentan altas cantidades de aluminio y se pueden usar como tierras de cultivo.

**Figura 17.**

Suelo del tipo Fluventic Eutrudepts



**Nota.** Posible imagen que describe el suelo del tipo Fluvaquentic Eutrudepts. Tomado de “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá d.c, 2005. <http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>

4.1.3.c. SUELO 3 - Asociación Chromic Endoaquerts – Hidric Sphagnofibrists. Topografía plana (pendientes del 0 – 1%) donde existen cultivos como pastos naturales, terreno compuesto por suelos Chromic Endoaquerts 60%, Hidric Sphagnofibrists 30% e inclusiones de Typic Psammaquents 10%.

Los suelos Chromic Endoaquerts son de color gris oscuro con manchas rojo-amarillentas y texturas arcillosa o arcillo-limosa (contenidos de arcilla mayorea al 60%), baja permeabilidad, tendencia a la acidez alta y fertilidad natural alta.

Los suelos Hidric Sphagnofibrists son de color negro y con textura de residuos vegetales en proceso de descomposición (pantanosos), con tendencia a la acidez alta y fertilidad natural alta.

Los suelos Typic Psammaquents son de color pardo oscuro o gris oscuro con texturas de residuos orgánicos moderadamente descompuestos y franco-arenosa, con tendencia a la acidez y fertilidad natural moderada.

Los suelos de la Asociación Chromic Endoaquerts – Hidric Sphagnofibrists pueden tener usos en cultivos comerciales.

**Figura 18.**

Suelos de la asociación Chromic Endoaquerts – Hidric Sphagnofibrists.



**Nota.** Posible imagen que describe el suelo del tipo Chromic Endoaquerts – Hidric Sphagnofibrists. Tomado de: “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá d.c, 2005.

<http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>

4.1.3.d. SUELO 4 - Consociación Oxic Dystrudepts. Topografía ligeramente plana (pendientes del 1 – 3%) donde existen cultivos como pastos india, ángleton, brachiaria, puntero y grama, terreno compuesto por suelos Oxic Dystrudepts 80% e inclusiones de suelos Typic Eutrudepts 20%.

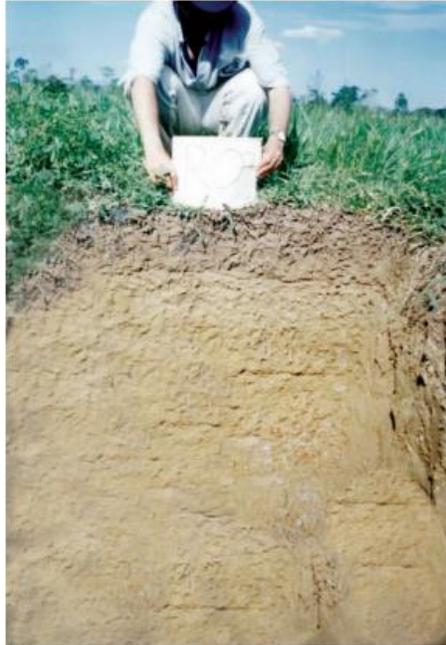
Los suelos Oxic Dystrudepts son de color gris con manchas rojo-amarillentas u oliva con manchas grises, con texturas franco-arcillosas, arenosas o arcillosas, con baja permeabilidad, tendencia a la acidez y fertilidad natural baja.

Los suelos Typic Eutrudepts son de color gris oscuro con manchas pardo-rojizas y texturas franco-arenosa y arcillo-arenosa, con baja permeabilidad, tendencia a la acidez y fertilidad natural moderada.

Los suelos de la Consociación Oxic Dystrudepts pueden ser acondicionados para su uso en cultivos comerciales.

**Figura 19.**

Suelos del tipo Oxic Dystrudepts.



**Nota.** Posible imagen que describe el suelo del tipo Oxic Dystrudepts. Tomado de “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá d.c, 2005. <http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>

#### **4.2 Sitio de estudio**

Este proyecto se realizó dentro de las instalaciones del conjunto residencial Rincón de San Pedro que se encuentra en el noroccidente de la ciudad de Bogotá vía Guaymaral. Latitud: 4.741, Longitud: -74.084 Latitud: 4° 44' 28" Norte Longitud: 74° 5' 2" Oeste.

La zona donde de estudio se ubica en la localidad de Suba y tiene una altura cercana a los 2.571 msnm, con condiciones climáticas frías y localizada sobre la cordillera oriental.

## Figura 20.

### *Ubicación sitio experimental*



**Nota.** Ubicación de la zona donde se realizó el sembradío de las especies. Google. (s.f.). [Indicaciones de Google Maps para llegar al conjunto residencial Rincón de San Pedro]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/place/Conjunto+Residencial+Rinc%C3%B3n+de+San+Pedro/@4.8197813,-74.0764527,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3f865659b4ec6b:0xa4ebabfa72141080!8m2!3d4.819776!4d-74.074264?hl=es> [Acceso: abril 10, 2021] [65]

### **4.3 Generalidades del diseño**

El área en donde se va a realizar el proyecto será topográficamente plana, con una temperatura que oscila entre 12 – 25 °C, con condiciones de humedad relativa de aproximadamente 79% (HR Bogotá d.c). Para la siembra de las plantas se usó de fertilizante la urea con una mezcla de fertilizantes y sustratos.

Además, las plantas se sembraron previamente con suelo fértil proporcionado por Mansarovar S.A.S para su posterior nacimiento y trasplante al suelo contaminado.

### **4.4 Lugar de extracción suelo contaminado**

Se debe considerarse la ubicación de los campos, pozos y oleoductos donde se realiza la Exploración, Perforación, Completamiento, Producción, Transporte, Refinación y Abandono del petróleo. Para este proyecto se decidieron tomar como lugares de referencia para la obtención del suelo las zonas aledañas al Campo de producción petrolera Velásquez de Mansarovar Energy que se ubica en la vereda Calderón del municipio de Puerto Boyacá en el Departamento de Boyacá y en la cuenca del valle medio del Magdalena, la ruta seguida desde Bogotá hasta Puerto Boyacá es la descrita en la **Figura 21** (Todo el recorrido de color morado).

**Figura 21.**

*Ubicación del suelo de estudio.*



**Nota.** Ruta a seguir para llegar a Puerto Boyacá- sitio de obtención de suelo contaminado Agencia Nacional de Infraestructura, «Mapa general Ruta de la Ejecución 17,» Slideshare, 2013. [En línea]. [https://es.slideshare.net/ANI\\_Colombia/mapa-general-ruta-de-la-ejecucin-17](https://es.slideshare.net/ANI_Colombia/mapa-general-ruta-de-la-ejecucin-17).

#### **4.5 Acondicionamiento del suelo contaminado**

Para determinar las características del suelo a tratar se decidieron utilizar los siguientes parámetros:

**Tabla 6.**

*Caracterización del suelo*

Propiedad del suelo	Método experimental
pH	pH metro
TPH	Extracción gravimétrica de TPH
Densidad aparente	Cilindro (Maseta)
Porosidad Total	Calculada a partir de densidad real y aparente
% retención de humedad	Diferencia de pesos ( $W_s$ vs $W_w$ )
Carbono orgánico	Método de Walkley-Black.

*Nota.* Esta tabla muestra se muestran las propiedades y métodos de determinación empleados para la caracterización del suelo. Tomado de. M. C. Daza Torres, F. Hernández Flórez, y F. A. Triana, «Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia», Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín, vol. 67, n.º 1, pp. 7189-7200, ene. 2014.

Se va a usar Plantatierra que es “un tipo de tierra de alta calidad técnicamente balanceada, a base de materias ricas en minerales para el fortalecimiento, desinfección, humedad y aplicabilidad (fácil manejo)” con el fin de acondicionar de manera idónea las muestras de suelo.

“Es un suelo que permite a la planta desarrollar las raíces y crecer vigorosamente, además sirve para completar el nivel en las materas o jardines cuando por acción del riego se ha bajado”. [45]

Igualmente 2 semanas antes, se hace un pretratamiento del suelo para eliminar las impurezas (piedras, basura, componentes dañinos, etc.), además de hidratarlo con abundante agua, agregando sustrato y fertilizante, para preparar el caldo de cultivo para las plantas.

#### **4.6 Diseño de experimentos**

El proyecto consistió en establecer las diferencias en la capacidad fitorremediativa de los 3 tipos de plantas expuestas a suelos con concentraciones de petróleo mediano (Obtenido en el campo Velásquez de Mansarovar en Puerto Boyacá el cual tiene como gravedad 22 °API lo que se cataloga como petróleo mediano según la ANH), puesto que se desconocían las capacidades de estas plantas en el campo de la remediación en especial cuando la contaminación se daba por hidrocarburos.

Basados en lo anteriormente mencionado, es necesario establecer las diferencias en la remediación mediante datos cuantitativos, con el fin de dar mayor validez al estudio realizado. De esta manera fue necesario llevar a cabo una serie de experimentos que permitieron diferenciar la capacidad fitorremediativa mediante variables cuantificables, como lo es la disminución de los datos de TPH antes y después de la intervención de las especies de estudio.

Inicialmente se definió el factor que se trabajó en el diseño el cual fue la Fitorremediación por especie (Medición de la eficiencia de cada planta estudiada las cuales son el pasto, el trigo y el girasol) debido a que la base del proyecto es la capacidad fitorremediativa de cada especie.

Luego de definir el factor a estudiar se definieron las **variables respuesta**, esas variables respuesta fueron seleccionadas debido a su importancia en lo que concierne en la contaminación y remediación de un suelo. **La primera variable respuesta es el TPH**, medida porcentual de la cantidad de hidrocarburos totales de petróleo en un suelo, por lo tanto, para este estudio es fundamental el estudio de esta variable, debido a que es la que permite conocer si hubo un proceso de remediación, mediante su medición antes y después de la intervención de las especies de estudio. Esta variable fue medida dos veces a lo largo de la experimentación, permitiendo determinar y cuantificar la disminución de la variable estudiada debido a la influencia de cada especie. **La segunda variable seleccionada fue el porcentaje de carbono orgánico (C<sub>org</sub>)**, medida de la cantidad de carbono orgánico presente en un suelo, la medición de esta variable permite

conocer la capacidad de auto remediación de un suelo debido a que a mayor porcentaje de Corg mayor cantidad de nutrientes tendrá el suelo y por lo tanto hay una tendencia a la auto recuperación del sistema. Esta variable fue medida una vez a lo largo de la experimentación y fue contrastada con datos obtenidos mediante bibliografía.

*Como variables fijas o constantes*, se tienen variables tales como, la *profundidad* a la que fue tomada la muestra de suelo, así como la *masa* de esta muestra y la *cantidad de petróleo contaminante* en la muestra.

Finalmente, el proyecto contó con dos niveles, los cuales fueron la proveniencia de los suelos de estudio (suelos contaminados con petróleo provenientes de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velásquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá y suelos contaminados con petróleo provenientes de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá) con el fin de delimitar la zona en que se tomaron las muestras de los suelos y las condiciones en las que se encontraron.

La cantidad de veces que se repitió el experimento de carbono orgánico fue de 3 veces por cada tipo de suelo y la experimentación de TPH se realizó al principio de la fitorremediación para cada tipo de suelo y el final del proceso con cada especie de estudio, esto con el fin de darle un orden definido al proyecto.

Las muestras de TPH se tomaron al principio y al final teniendo en cuenta un periodo de 4 meses (entre el principio y el final del proyecto), con el fin de que se formara la rizosfera (raíces de las plantas) de una mejor manera, haciendo los respectivos análisis en el laboratorio para determinar el porcentaje de remoción de los TPH en los suelos estudiados.

El diseño de experimentos seleccionado fue un diseño factorial con dos factores (La proveniencia de los suelos y la especie de estudio), con dos niveles en el primer factor (Suelo proveniente de la ciénaga Palagua y suelo proveniente del oleoducto del campo Velásquez) y 3 niveles en el segundo factor (Pasto *Megathyrus Maximus*, girasol *Heliantbus Annus L* y trigo *Triticum Aestivum*) respectivamente. Se llevaron a cabo dos experimentos con el mismo arreglo factorial, midiendo

las variables TPH y Corg con el fin de obtener la variable respuesta (% Remediación), con una corrida experimental en el caso del TPH y tres corridas experimentales en el caso del Corg.

Con este diseño experimental se busca probar la hipótesis de que, al utilizar un método de fitorremediación, como es el agregar las especies mencionadas a muestras de suelo contaminadas con petróleo, la variable de TPH disminuirá en todos los casos, indicando así que el proceso de remediación fue exitoso, con una variable respuesta % Remediación que cuantifica la efectividad de la remediación en un porcentaje.

#### 4.6.1 Diseño para hidrocarburos totales de petróleo (TPH)

El estudio de eficiencia de la fitorremediación se hace basados en los valores de TPH, tomando como referencia los datos iniciales y finales de este parámetro, por lo tanto, el análisis de TPH en los suelos tratados por cada especie estudiada será el indicador primario del proyecto y a la final el que destacará la especie que más remedia como se puede evidenciar los porcentajes de la **Tabla 7** en donde se comparan los datos iniciales y finales.

**Tabla 7.**

TPH en diseño de experimentos

Especies	TPH inicial	TPH final
<i><b>MEGATHYRSUS MAXIMUS</b> en suelo proveniente de tierra firme proveniente de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velásquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá.</i>	TPH suelos contaminados con petróleo provenientes de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velásquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá:	TPH final luego de la siembra de <i><b>MEGATHYRSUS MAXIMUS</b></i>
		1,61%
<i><b>HELIANTBUS ANNUUS</b> en suelo proveniente de tierra firme proveniente de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velásquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá.</i>	2.09%	TPH final luego de la siembra de <i><b>HELIANTBUS ANNUUS L</b></i>
		0,74%

<b><i>TRITICUM AESTIVUM</i></b> <b><i>en suelo proveniente de tierra firme proveniente de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velásquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá</i></b>		TPH final luego de la siembra de <b><i>TRITICUM AESTIVUM</i></b>  1,02%
<b><i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i></b> <b><i>en suelo proveniente de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá</i></b>	TPH suelos contaminados con petróleo provenientes de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá:  0,77%	TPH final luego de la siembra de <b><i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i></b>  0,22%
<b><i>HELIANTHUS ANNUUS L</i></b> <b><i>en suelo proveniente de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá</i></b>		TPH final luego de la siembra de <b><i>HELIANTHUS ANNUUS L</i></b>  0,41%
<b><i>TRITICUM AESTIVUM</i></b> <b><i>en suelo proveniente de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá</i></b>		TPH final luego de la siembra de <b><i>TRITICUM AESTIVUM</i></b>  0,6%

**Nota:** Descripción de los datos de TPH obtenidos de la experimentación.

#### 4.6.2 Diseño para Carbono orgánico (C<sub>org</sub>)

El carbono orgánico es otro factor clave en la investigación debido a que las incidencias del petróleo en este darán cabida a un análisis de la problemática que genera la contaminación con este compuesto, los valores experimentales del C<sub>org</sub> se compararon con respecto a la bibliografía para saber si la presencia de hidrocarburos generó un impacto alto en los suelos estudiados, esto se puede evidenciar en los porcentajes que se obtuvieron al final de la contaminación y posterior remediación. El porcentaje final denota más que todo los tipos de suelos que se trataron y la capacidad de estos de autor remediarse, entre más alto sea el valor mayor capacidad auto remediativa tienen estos suelos y mayor capacidad de volver a cultivar en estos suelos va a haber, además de lo anteriormente dicho la comparación se hace entre datos teóricos ( 50% el valor más alto con tierras negras y con alta cantidad de nutrientes más que aptos para cultivos) y los datos

obtenidos para suelos arcillosos (obtenidos para el proyecto) calculados en laboratorio, esta comparación se puede evidenciar en la Tabla 8 y arrojó los siguientes datos:

**Tabla 8.**

COT en diseño de experimentos

Especies	Ubicación de las muestras	C <sub>org</sub> teórico	C <sub>org</sub> experimental
Montaje 1: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE UN SUELO SECO CERCANO A OLEODUCTO VEL-169 DEL CAMPO VELASQUEZ DE MANSAROVAR UBICADO EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA EN PUERTO BOYACÁ.	Oleoducto VEL-169 del Campo Velasquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá.  (07-03-21)	Porcentaje de Carbono orgánico investigado por bibliografía.  0-50%	12,88%
Montaje 2: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE UN SUELO SECO CERCANO A OLEODUCTO VEL-169 DEL CAMPO VELASQUEZ DE MANSAROVAR UBICADO EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA EN PUERTO BOYACÁ.			15,9%
Montaje 3: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE UN SUELO SECO CERCANO A OLEODUCTO VEL-169 DEL CAMPO VELASQUEZ DE MANSAROVAR UBICADO EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA EN PUERTO BOYACÁ.			6,4%
Montaje 2: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE LA CIÉNAGA DE PALAGUA EN UNA ZONA CERCANA AL CAMPO DE PRODUCCIÓN.			

**Continuación Tabla 8**

Montaje 1: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE LA CIÉNAGA DE PALAGUA EN UNA ZONA CERCANA AL CAMPO DE PRODUCCIÓN	Ciénaga de Palagua ubicada en Puerto Boyacá.  (07-03-21)	Porcentaje de Carbono orgánico investigado por bibliografía. (FAO. 2017. Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia)  0-50%	15,08%
Montaje 2: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE LA CIÉNAGA DE PALAGUA EN UNA ZONA CERCANA AL CAMPO DE PRODUCCIÓN.			20,9%
Montaje 3: MUESTRA DE SUELO PROVENIENTE DE LA CIÉNAGA DE PALAGUA EN UNA ZONA CERCANA AL CAMPO DE PRODUCCIÓN			10,77%

**Nota.** Descripción de los datos de COT obtenidos de la experimentación.

- Otro tipo de experimentos: (Al margen izq)
  - pH: Se calcularon los pH's de cada suelo luego de la contaminación con petróleo mediano con el fin de comparar los datos con la bibliografía, no se incluyó en el diseño de experimentos debido a que el pH no muestra el alto impacto de la contaminación de petróleos en los suelos en comparación a los dos parámetros seleccionados.
  - %Humedad: Se calcularon los datos de humedad para cada tipo de suelo contaminado con petróleo
  - Tiempo: No es viable calcular la fitorremediación debido al tiempo ya que este ítem es impredecible y no necesariamente tiene influencia en el grado de fitorremediación de los suelos.
  - Porosidad: La porosidad se decidió investigar teóricamente según el tipo de suelo que se va a trabajar, por lo tanto, este parámetro no influiría en la fitorremediación final del proyecto y por lo tanto no se puede usar como parámetro para el diseño de experimentos.

## **4.7 Pruebas de laboratorio**

Este proyecto se va a realizar en un laboratorio dentro de las instalaciones de la Fundación Universidad América que se encuentra en el centro de la ciudad de Bogotá Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51" y en el laboratorio del profesor Nelson Fernández ubicado en la ciudad de Bogotá igualmente

La zona donde se realizó la experimentación se ubica en la localidad de La Candelaria y tiene una altura cercana a los 3.600 msnm, con condiciones climáticas frías y localizada sobre la cordillera oriental.

Para la parte experimental del proyecto se tomaron algunas muestras de crudo mediano para su caracterización teórica (Gravedad API) y para los estudios de la disminución de TPH en los suelos contaminados se tomaron muestras conocidas de suelo en donde se tomarán datos de pH, % de retención de humedad y carbono orgánico, esto con el fin de analizar el tipo de suelo trabajado y las consecuencias de su contaminación con petróleo mediano.

A continuación, se explica en que consiste cada prueba:

### **4.7.1 TPH**

Para determinar la cantidad de hidrocarburo total de petróleo se realizó una extracción gravimétrica, la cual data de los siguientes pasos:

Las muestras fueron analizadas mediante extracción Soxhlet y detección gravimétrica, de acuerdo con los métodos EPA 3540C (1996a) y 9071B (1998), respectivamente, utilizando tres disolventes de distinta polaridad y aplicando diferentes tiempos de extracción. El criterio para la selección de tres disolventes para la extracción se basó en la constante dieléctrica; la cual, se tomó como una medida de la polaridad del disolvente (Wade 1993; Lide 1999; Dupont & Gokel 2007). Para realizar la investigación, se propuso un diseño experimental con los factores bajo estudio indicados en la Tabla 3, donde se observa cuatro niveles para el factor tiempo (4, 8 12 y 16 h), 3 niveles del factor suelo (Antrosol, Gleysol e Histosol) y 3 niveles de disolvente (metanol, hexano y diclorometano). [46]

#### **4.7.2 pH**

Basados en investigaciones se llegó a la conclusión de plantear el siguiente procedimiento para calcular el pH en el suelo a tratar:

- Se toma una muestra de tierra, previamente secada a unos 90°C durante varias horas.
- Esta muestra de tierra se tamiza con un tamiz de 2mm.
- Coger una muestra y pesar 10g de tierra en balanza analítica AVW 220D marca Shimadzu.
- Preparar la tierra para su dilución.
- Añadir la muestra a un Beaker con 25ml de agua destilada.
- La mezcla se agita durante tres minutos.
- Posteriormente, ésta se deja reposar durante 15 minutos.
- Ya está lista la muestra para medir el pH en el sobrenadante.
- Medición del pH por pH-metro marca Hanch estandarizando la polaridad del suelo según datos.
- El peso calculado para el Beaker es de 31,5058g.
- Los pH calculados para cada muestra de suelo son de:
  - pH suelo 1 (suelos contaminados con petróleo provenientes de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velásquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá):7,22
  - pH suelo 2 (suelos contaminados con petróleo provenientes de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá): 7,51

Como se puede evidenciar en los cálculos de pH se ve una ligera tendencia de los suelos a tener un comportamiento básico, pero cercano a la neutralidad propio de estos suelos.

#### **4.7.3 Porcentaje (%) de retención de humedad**

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, o sea:

**Ecuación 2. Determinación del contenido de Humedad**

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

**Nota:** Ecuación para el contenido de humedad expresado en %, **Fuente:** Escuela de ingeniería en construcción-laboratorio de mecánica de suelo

Donde: W = contenido de humedad expresado en %, W<sub>w</sub> = Peso del agua existente en la masa de suelo y W<sub>s</sub> = peso de las partículas sólidas. [47]

Los pesos de las muestras se obtuvieron por medio de la balanza Sartovious la cual arrojó los siguientes datos:

- Peso suelo 1 con recipiente: 385,713g
- Peso recipiente: 100,087g
- Peso húmedo: 286,628g
- Peso seco con recipiente (después de dos días): 334,658g

Peso muestra 1 seco: 234,571g

Porcentaje de humedad muestra 1: 21,75%

- Peso suelo 2 con recipiente: 385,807g
- Peso recipiente: 100,087g
- Peso húmedo: 285,72g
- Peso seco con recipiente (después de dos días): 186,86g

Peso muestra 2 seco: 86,7765

Porcentaje de humedad muestra 2: 52,903%

#### 4.7.4 Carbono orgánico

Para el cálculo de este ítem se toman 3 muestras de cada tipo de suelo (Seco y proveniente de la ciénaga), con el fin de homogenizar las muestras de los suelos, estas se secaron a 90°C por dos días, se molieron en un mortero de porcelana y se acondicionaron para su procesamiento físico-químico.

El contenido de carbono orgánico total (COS) en el suelo se calculó por medio del método de Walkley-Black en donde la oxidación del carbono orgánico del suelo se dio a partir de una disolución de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_4$ ) generando un calor de reacción al mezclar la disolución con ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ). Después de un tiempo de esperó a que la mezcla se diluyera y se adicionó ácido fosfórico para evitar interferencias de  $Fe^{3+}$  y el dicromato de potasio residual fue valorado con sulfato ferroso ( $FeSO_4$  1N. pH 7) Posteriormente, la estimación del carbono orgánico total se determinó a partir de la siguiente ecuación:[48]

#### **Ecuación 3. Carbono Orgánico Total**

$$C_{org} = V \left( \frac{M}{B} \right) * \frac{0.003}{P_m} * (100 + P_w)$$

Donde:

V= Volumen de dicromato empleado en el blanco y en la muestra; M= Volumen de solución ferrosa empleada en la muestra; B=Volumen de la solución ferrosa empleada en el blanco; P<sub>m</sub>= Peso de la muestra en gramos; P<sub>w</sub>: Porcentaje de humedad (%).

Arrojando los siguientes datos experimentales:

**Tabla 9.**

% de carbono orgánico En suelo cercano al oleoducto

MUESTRA 1 (SUELO PROVENIENTE DE UN SUELO SECO CERCANO A OLEODUCTO)	
Montaje 1	12,88%
Montaje 2	15,9%
Montaje 3	6,4%

**Nota:** Datos de COT para muestra de suelo seco cercano al oleoducto.

Los cambios en los porcentajes de carbono orgánico en la muestra 1 están sujetos a errores tanto experimentales como errores humanos, de ahí la variación en resultados.

**Tabla 10.**

% de carbono orgánico En suelo ciénaga

MUESTRA 2 (SUELO PROVENIENTE DE UN SISTEMA ACUOSO CERCANO A OLEODUCTO)	
Montaje 1	15,08%
Montaje 2	20,9%
Montaje 3	10,77%

**Nota:** Datos de COT para muestra de suelo proveniente de un sistema acuoso.

Los cambios en los porcentajes de carbono orgánico en la muestra 2 están sujetos a errores tanto experimentales como errores humanos, de ahí la variación en resultados.

## 5. ESTUDIO DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Para los costos del proyecto vamos a señalar únicamente las materias primas, sustratos y fertilizantes gastados, así como los preliminares, pruebas de laboratorio, mano de obra, talento humano, y demás costos del proyecto, junto con una proyección de un escenario real.

En cuanto a los costos netos del proyecto se tuvo en cuenta:

-Macetas, adecuación del terreno, cerramiento y demás preliminares

-Obtención del suelo contaminado

-Insumos, plantas y fertilizantes

- Pruebas de laboratorio

- Servicios

-Salario Investigadores

-Otros

**Tabla 11.** Costos generales del proyecto

ITEM	DESCRIPCION	UND.	CANT.	VLR. UNITARIO	VLR. TOTAL
<b>1</b>	<b>Preliminares</b>				
<b>1.1</b>	<b>Cerramiento</b>				
1.1.1	Malla	m	15.00	\$ 3,000	\$ 45,000
1.1.2	Puntilla 1 1/2"	lb	1.00	\$ 4,000	\$ 4,000
1.1.3	Bastidor 30x30x2150	Und	8.00	\$ 10,900	\$ 87,200
1.1.4	Corte recto madera	Und	8.00	\$ 300	\$ 2,400
<b>1.2</b>	<b>Insumos</b>				
1.2.1	Semillas trigo por 5 kg (incluye envío)	Paquete	1.00	\$ 44,100	\$ 44,100
1.2.2	Semillas Panicum maximus agrosavia sabanera (pasto) por 1 kg (incluye envío)	Paquete	1.00	\$ 57,500	\$ 57,500
1.2.3	Plantulas de girasol iniciales	Und	2.00	\$ 10,000	\$ 20,000
1.2.4	Plantulas de girasol finales	Und	2.00	\$ 7,000	\$ 14,000
1.2.5	Semillas girasol	Und	1.00	\$ 5,000	\$ 5,000
1.2.6	Maceta girasol	Und	1.00	\$ 20,000	\$ 20,000

Continuación Tabla 11.

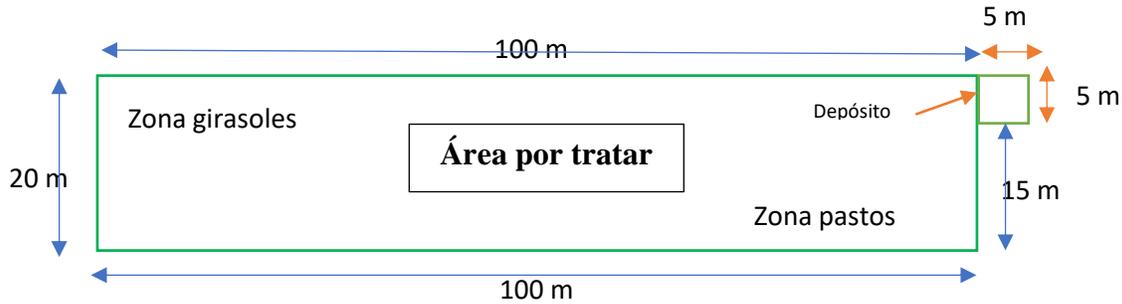
<b>1.3</b>	<b>Obtención de suelo contaminado</b>				
<b>1.3.1</b>	Tiquetes a puerto Boyacá	Und	4.00	\$ 50,000	\$ 200,000
<b>1.3.2</b>	Hospedaje	Día	2.00	\$ 30,000	\$ 60,000
<b>1.3.3</b>	Alimentación (por los dos)	Día	3.00	\$ 60,000	\$ 180,000
<b>2</b>	<b>EXPLORACION</b>				
<b>2.1</b>	<b>Primera Aplicación de sustratos y fertilizantes</b>	Paquete	1.00	\$ 4,000	\$ 4,000
<b>2.2</b>	<b>Segunda Aplicación de sustratos y fertilizantes</b>	Paquete	1.00	\$ 4,000	\$ 4,000
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTACION</b>				
<b>3.1</b>	<b>Pruebas iniciales</b>				
	pH	Und	2	\$ 17,000	\$ 34,000
	% Humedad	Und	2	\$ 16,000	\$ 32,000
	Carbono Orgánico	Und	2	\$ 29,000	\$ 58,000
	HCl (Reactivo sin existencia en la universidad)	Und	1	\$ 10,000	\$ 10,000
	TPH	Und	2	\$ 28,000	\$ 56,000
<b>3.2</b>	<b>Pruebas finales</b>				
<b>3.2.1</b>	Toma de muestras				
	Bolsas ziploct grandes (toma de muestras plantas) x 5 unidades	paquete	1	\$ 6,000	\$ 6,000
	Bolsas ziploct medianas (toma de muestras suelos) x 8 unidades	paquete	1	\$ 5,000	\$ 5,000
<b>3.2.2</b>	TPH	Und	1	\$ 170,000	\$ 170,000
<b>4</b>	<b>Servicios</b>				
	Transporte	Viaje	10	\$ 20,000	\$ 200,000
	Agua	m <sup>3</sup>	4	\$ 2,859	\$ 11,435
<b>5</b>	<b>Talento Humano</b>				
	Investigadores	Und	2	\$ 3,634,104	\$ 7,268,208
	<b>Costo total</b>				<b>\$ 8,597,843</b>

**Nota:** Las pruebas se realizaron en las instalaciones de la Universidad América, pero se tuvo en cuenta un aproximado del valor comercial según los precios del mercado.

Igualmente se realizó una proyección en un escenario “real” con las siguientes dimensiones:

**Figura 22.**

*Área para tratar simulada*



**Nota:** Área establecida para el estudio de los costos de implementación a escala real del proyecto.

Para el escenario que vamos a plantear se tomaron dimensiones de 100x20 con un espacio de 5x5 de depósito. Además, tiene una profundidad de 0.5 m.

El área analizada fue planteada debido a la necesidad de remediar espacios extensos con problemas ambientales de este tipo, con bajos costos y con técnicas alternativas. En Colombia la fitorremediación no se ha implementado en ningún campo petrolero por lo que es una posible solución a derrames ocurridos en estos o en zonas aledañas.

Por otro lado, los precios y variables del escenario fueron basados en valores del mercado colombiano tomando como referencia la página “Colombia.generadordeprecios.com” para realizar un análisis real de la implementación de la técnica de fitorremediación como alternativa para remediación de derrames de HC. Es pertinente aclarar que estos valores son teóricos y depende del tamaño del terreno a tratar, así como la cantidad de horas, mano de obra gastada, insumos y demás factores reales. [49]

Para ello se va a realizar **análisis de precios unitarios (A.P.U.)** según la **Tabla 12** donde los factores que se van a tener en cuenta son los siguientes:

## **1. Preliminares**

**1.1 Localización y replanteo (Unidad=M2):** Comprende los trabajos necesarios para retirar de las zonas previstas para la edificación o urbanización: pequeñas plantas, maleza, broza, maderas caídas, escombros, basuras o cualquier otro material existente, hasta una profundidad no menor que el espesor de la capa de tierra vegetal, considerando como mínima 25 cm; y carga manual a camión.

**1.2 Descapote y limpieza de terreno, con medios manuales (Unidad=M2):** Contrapiso realizada mediante relleno a cielo abierto, con tierra de préstamo, y compactación en tongadas sucesivas de 30 cm de espesor máximo con rodillo vibrante de guiado manual, hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 90% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. El precio no incluye la realización del ensayo Proctor Modificado.

**1.3 Despedregado del terreno suelto (Unidad=M2):** Retirada y carga sobre camión o contenedor de los materiales de descapote, previamente troceados y apilados, con medios manuales

**1.4 Retirada y carga de los materiales de descapote (Unidad=M3):** Despedregado del terreno suelto, con medios manuales.

**1.5 Relleno de nivelación con tierra (Unidad=M3):** Plasmar planos y medidas del terreno

## **2. Cerramiento provisional en polisombra (Unidad=ML)**

**3. Siembra (Unidad=M2):** Plantación girasol y de pasto realizado con medios mecánicos; suministro en contenedor. Incluso tierra vegetal cribada y substratos vegetales fertilizados

**4. Abonado (Unidad=M2):** Abonado de fondo de terreno suelto con abono mineral sólido de liberación rápida, extendido con medios manuales, con un rendimiento de 0,05 kg/m<sup>2</sup>, procurando un reparto uniforme.

## **5. Riego**

**6. Disposición final de residuos peligrosos (Unid=Global):** Transporte de bidón de 200 litros de capacidad con residuos peligrosos procedentes, a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos, centro de valorización o eliminación de residuos, considerando la carga y descarga de los bidones.

**Tabla 12.**

*ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS*

<b>1.1</b>	<b>Localización y replanteo</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
MATERIALES	Liston 2x2x3 m	Und	.1100	3,130	344.3
	Puntilla 2 CC	Lbs	.0200	1,739	34.8
	Piola gruesa 50 metros	Rollo	.0600	1,739	104.3
	Mineral Rojo	Kg	.0050	3,269	16.3
MANODEOBR	MANO DE OBRA (2 ayudantes y 1 oficial)	h	.0639	15,616	997.9
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	Global	0.08	3,338.00	2.7
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M2</b>			<b>\$ 1,500</b>

<b>1.2</b>	<b>DESCAPOTE Y LIMPIEZA DEL TERRENO, CON MEDIOS MANUALES</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
EQUIP	EQUIPO (Desbrozadora equipada con disco de dientes de sierra)	h	0.0192	7692.31	147.692352
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón de obra blanca)	h	0.377	10017.22	3776.49194
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	3,780	75.6016
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M2</b>			<b>\$ 4,000</b>

<b>1.3</b>	<b>Despedregado del terreno</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón jardinero)	h	.0790	9,933	784.70
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	744.97	14.90
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M2</b>			<b>\$ 800</b>

Continuación Tabla 12.

<b>1.4</b>	<b>Retiro de material sobrante</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón jardinero)	h	5.0000	9,999	49,994.50
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	1,750.00	35.00
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M3</b>			<b>\$ 50,030</b>
<b>1.5</b>	<b>Relleno de nivelación con tierra</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Material	Tierra de prestamo materia orgánica	m3	1	10540.28	10540.28
EQUIP	EQUIPO (Rodillo vibrante de guiado manual)	h	0.11	17826.94	1960.9634
EQUIP	EQUIPO (Dumper de descarga frontal)	h	0.174	16,269	2830.84776
EQUIP	EQUIPO (Camión cisterna, de 8 m <sup>3</sup> de capacidad)	h	0.012	77,078	925
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón de obra blanca)	h	0.041	10,017	411
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	16,591	332
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M3</b>			<b>\$ 17,000</b>
<b>2.0</b>	<b>Cerramiento provisional en polisombra h=2.10 m</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
MATERIALES	Cerco ordinario x 3 m	Und	.4000	3,340.83	1,336.33
	Concreto de 2000 PSI	m3	.0100	634,079.47	6,340.79
	Puntilla con cabeza de 1"	lb	.1100	2,701.22	297.13
	Polisombra verde h=2.10	ml	1.0000	1,983.62	1,983.62
MANODEOBR	MANO DE OBRA (2 ayudantes)	h	.1495	20,269.03	3,030.22
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	Global	1	1,166.02	11.66
	<b>DIRECTO:</b>	<b>ML</b>			<b>\$ 13,000</b>

**Continuación Tabla 12.**

<b>3.0</b>	<b>Siembra</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
<b>3.1 Siembra Pasto</b>		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Material	Semillas Panicum maximus agrosavia sabanera (pasto) por 1 kg (incluye envío)	kg	.0225	57,500	1,293.75
Material	Tierra vegetal cribada, suministrada a granel	M3	0.15	45,169	6,775
Material	Abono mineral complejo NPK 15-15-15	Kg	0.10	781	78
Material	Agua	M3	0.15	2,859	429
EQUIP	EQUIPO (Rodillo ligero)	h	0.025	6,730	168
EQUIP	EQUIPO (Motocultor 60/80 cm..)	h	0.050	5,192	260
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón jardinero)	h	.226	9,932	2,245
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Oficial 1ª jardinero)	h	0.109	13,840	1,509
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	12,148.00	242.96
<b>DIRECTO:</b>		<b>M2</b>			<b>\$ 13,000</b>
<b>3.2 Siembra Girasol</b>		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Material	'Semillas Helliantbus Annus (girasol) por 0.1 kg (incluye envío)	kg	1	5,000	5,000
Material	Tierra vegetal cribada, suministrada a granel	M3	0.15	45,169	6,775
Material	Abono mineral complejo NPK 15-15-15	Kg	0.15	781	118
Material	Agua	M3	0.15	2,859	429
EQUIP	EQUIPO (Rodillo ligero)	h	0.025	6,730	168
EQUIP	EQUIPO (Motocultor 60/80 cm..)	h	0.050	5,192	260
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón jardinero)	h	.113	9,932	1,122
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Oficial 1ª jardinero)	h	0.057	13,840	782
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	12,048.00	240.96
<b>DIRECTO:</b>		<b>M2</b>			<b>\$ 9,900</b>

**Continuación Tabla 12.**

<b>4.0</b>	<b>Abonado de fondo.</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Material	Agua	M3	.0050	2,859	14.29
Material	Abono mineral sólido, de liberación rápida	Kg	0.05	3,812	190.59
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón jardinero)	h	0.002	10,411.09	20.82
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Oficial 1ª jardinero)	h	0.005	13,947.07	69.74
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	318.79	6.38
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M2</b>			<b>\$ 302</b>
<b>5.0</b>	<b>Riego</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Material	Agua	M3	.0050	2,859	14.29
MANODEOBR	MANO DE OBRA (Peón jardinero)	h	0.005	9,932.00	49.66
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	63.95	1.28
	<b>DIRECTO:</b>	<b>M3</b>			<b>\$ 65</b>
<b>6.0</b>	<b>Gestión de residuos peligrosos</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>VALOR TOTAL</b>
Material	Bidón de 200 litros de capacidad, apto para almacenar residuos peligrosos	Und	1.0000	114,352	114,351.97
MANODEOBR	MANO DE OBRA (peón de obra blanca)	h	0.130	9,932.90	1,291.28
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	115,643.25	2,312.87
Material	Transporte de bidón de 200 litros de capacidad, apto para almacenar residuos peligrosos, a vertedero específico, centro de valorización o eliminación de residuos	Und	1.00000	175,339.68	175,339.68
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	175,339.68	3,506.79
Material	Tasa de disposición final por entrega a gestor autorizado de residuos peligrosos	Und	1.00000	184,509	184,508.95
HERRMEN	HERRAMIENTA MENOR	%	2	184,425.95	3,688.52
DIRECTO:		<b>Globa</b>			<b>\$ 485,000</b>

**Nota:** Tabla de cuantificación de unidades y cantidades para el estudio de costos de implementación en: [http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/calculaprecio.asp?Valor=0|0|0|ADL005|adl\\_005: 1\\_0\\_10\\_0](http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=0|0|0|ADL005|adl_005: 1_0_10_0)

Se anexa el cuadro de cantidades de la obra a tratar (**ANEXO 7**):

Gracias a la **Tabla 12** y **Tabla 13** se puede calcular el presupuesto de la siguiente manera:

**Tabla 13.**

*Presupuesto*

<b>FUNDACION UNIVERSIDAD AMERICA PRESUPUESTO OBRA: FITORREMEDIACIÓN</b>					
<b>FECHA: 18-jun.-21</b>					
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION DE ACTIVIDADES</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANT</b>	<b>V/UNITARIO</b>	<b>V/TOTAL</b>
1	<b>PRELIMINARES</b>				
1.1	<i>Localización y replanteo</i>	M2	2025	\$ 1,500	\$ 3,037,500.00
1.2	<i>Descapote y limpieza de terreno</i>	M2	2025	\$ 4,000	\$ 8,100,000.00
1.3	<i>Despedregado</i>	M2	2025	\$ 800	\$ 1,620,000.00
1.4	<i>Retiro de material sobrante</i>	M3	608	\$ 50,000	\$ 30,400,000.00
1.5	<i>Relleno de nivelación con tierra</i>	M3	1013	\$ 17,000	\$ 17,221,000.00
2	<b>CERRAMIENTO</b>				
2.1	<i>Cerramiento provisional con polisombra</i>	MI	250	\$ 13,000	\$ 3,250,000
3	<b>SIEMBRA</b>				
3.1	<i>Siembra pasto</i>	M2	1000	\$ 13,000	\$ 13,000,000
3.2	<i>Siembra Girasol</i>	M2	1000	\$ 14.900	\$ 14,900,000
4	<b>ABONADO</b>				
4.1	<i>Abonado de fondo</i>	M2	2000	\$ 302	\$ 604,000
5	<b>RIEGO</b>				
5.1	<i>Riego</i>	M2	2000	\$ 65	\$ 130,000

**Continuación Tabla 13.**

6	<b>GESTION DE RESIDUOS PELIGROSOS</b>				
6.1	<i>Gestion de Residuos peligrosos</i>	GL	1	\$ 485,000	\$ 485,000
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>					<b>\$ 92,747,500</b>
	<b>ADMINISTRACION</b>	<b>10%</b>			<b>\$ 9,274,750</b>
	<b>IMPREVISTOS</b>	<b>4%</b>			<b>\$ 3,709,900</b>
	<b>UTILIDADES</b>	<b>9%</b>			<b>\$ 8,347,275</b>
	<b>IVA SOBRE UTILIDAD (19%)</b>				<b>\$ 1,585,982</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>					<b>\$ 115,665,407</b>

**Nota:** Descripción del presupuesto.

**TIEMPO DE EJECUCION: 4 MESES**

La **Tabla 13** muestra que la mayor inversión generada se da en la fase de preliminares debido a que se debe hacer una adecuación al terreno contaminado, esto implica gastos en limpieza, replanteamiento del terreno y demás, siendo el factor determinante el retiro de material sobrante con un valor aproximado de 30.000.000 COP.

Igualmente se ve un valor menor en la siembra de semillas del pasto respecto a las del girasol en 1.900.000 debido a que es más eficiente la semilla del pasto respecto a la del girasol. Se puede apreciar que es una técnica supremamente barata con un bajo costo de implementación y con buena proyección.

## 6. ALCANCE

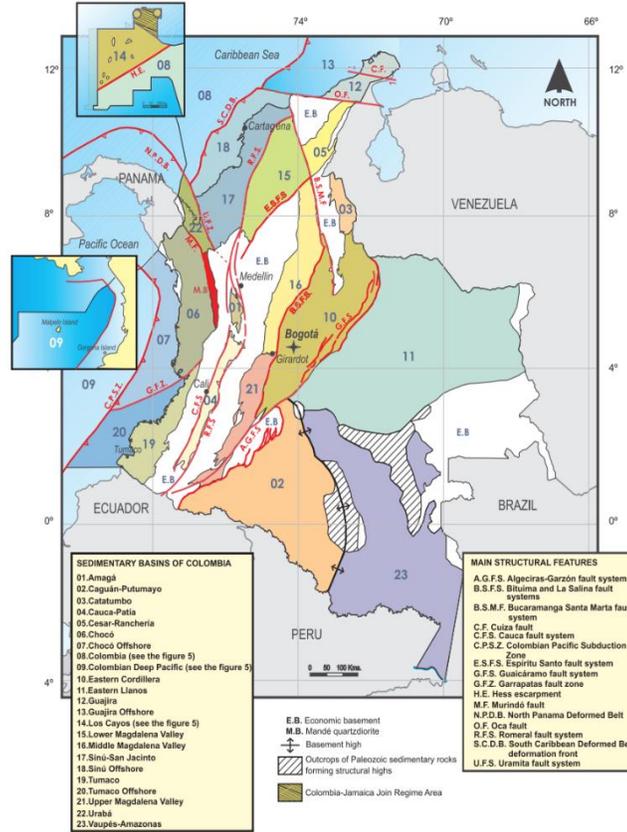
Este trabajo tiene como finalidad buscar una alternativa de remediación para contaminación de suelos por derrame de hidrocarburos medianos mediante el uso de la del PASTO *MEGATHYRSUS MAXIMUS*, el GIRASOL *HELIANTHUS ANNUUS L* y el TRIGO *TRITICUM AESTIVUM* como agentes fitorremediadores, llegando hasta el conocimiento del potencial fitorremediativo de cada especie propuesta. La temperatura de evaluación de las plantas propuestas será entre 12 y 30 °C aproximadamente debido a que son las ideales para el crecimiento. Asimismo, será llevado a cabo en un tiempo de aproximadamente 3 meses (tiempo en que las plantas empiezan a fitorremediar por su rizosfera).

### 6.1 Área de influencia

El área de influencia para desarrollar esta técnica es aquella que haya sido contaminada por hidrocarburos de petróleo mediano. Para esto debe considerarse la ubicación de los campos, pozos y oleoductos donde se realiza la Exploración, Perforación, Completamiento, Producción, Transporte, Refinación y Abandono del petróleo debido a que estos los sitios directamente afectados. Para este proyecto se decidieron tomar como lugares de referencia para la obtención del suelo las zonas aledañas al Campo de producción petrolera Velásquez de Mansarovar Energy que se ubica en la vereda Calderón del municipio de Puerto Boyacá en el Departamento de Boyacá y en la cuenca del valle medio del Magdalena.

**Figura 23.**

*Mapa de Cuencas sedimentarias en Colombia*



**Nota.** La figura representa la ubicación de las 23 cuencas sedimentarias en Colombia. Tomado de: *La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia*. Requisitos. Agencia Nacional de Hidrocarburos (2007).

Cabe aclarar que se deben analizar las características del derrame para saber si es viable o no el uso de la fitorremediación como técnica de recuperación de suelos y por lo tanto se debe de hacer una caracterización de las materias primas empleadas en el proyecto.

Por último, se tomaron dos tipos de muestras de suelos, uno proveniente de la ciénaga Palagua y otra del oleoducto VEL-169.

**Figura 24.**

*Mapa de Oleoductos en Colombia*



*Nota.* La figura representa la ubicación de los diferentes tipos de oleoductos, poliductos y gasoductos en Colombia. Tomado de: *Las Voladuras de Oleoductos en Colombia*. Requisitos. <http://andandoporbogota.blogspot.com/2015/02/las-voladuras-de-oleoductos-en-colombia.html>

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de los procesos de experimentación y de las respectivas caracterizaciones se procedió a realizar un análisis detallado de cada parámetro y aspecto importante a tener en cuenta para la realización final del proyecto, la metodología a seguir será de el planteamiento de una tabla y basados en la tabla se hará su respectivo análisis, además de una breve explicación de cuál es la importancia de cada parámetro analizado, los análisis se realizan a continuación:

**Tabla 14.**

*Características finales de las especies de estudio*

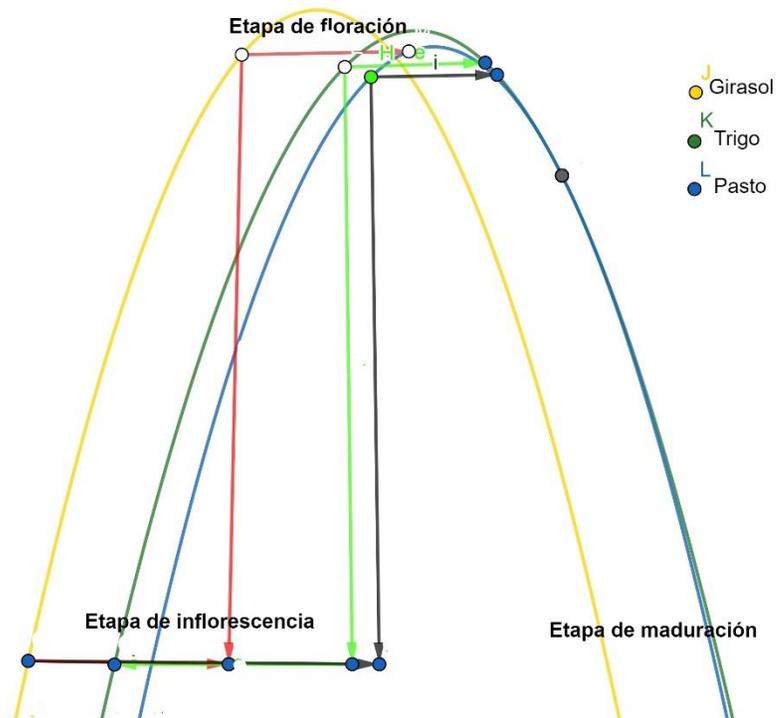
Especie	Altura especie (cm)	Altura raíz (cm)	Color-floración	Estado
<i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i> ( <i>pasto</i> )	27-32	11-21	Verde con algunas zonas amarillas	Vivo
<i>HELIANTHUS ANNUUS L</i> ( <i>girasol</i> )	27-30	8	Café- negro/ flor amarilla quemada	Muerto
<i>TRITICUM AESTIVUM</i> (trigo)	70-90	17-23	Amarillo verdoso	Vivo

**Nota.** Características físicas finales de las plantas en la experimentación

Según la **Tabla 15** Todas las especies presentaron un buen crecimiento, en especial el trigo que a pesar de la presencia del petróleo logró alturas cercanas a los 90 cm. Igualmente se pudo observar un comportamiento de las plantas similar causado por la acción del hidrocarburo, el cual empieza a quemar las especies, llegando a colores amarillos para los pastos y negro- amarillo quemado por parte del girasol. Este comportamiento se puede explicar debido a la alta carga orgánica que reciben las plantas desde la rizosfera, lo que sucede es que la plantas actúan fitorremediando desde sus raíces, y por esto entre más larga sea la raíz mejor, pero va a haber un punto en que la planta no soporte tanta cantidad de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos y finalmente no puede recibir más carga y muere, como se puede evidenciar en el **ANEXO B** más específicamente el girasol el cual por la alta carga de HC recibida presentó un bajo crecimiento de la raíz y un proceso de mortalidad acelerado respecto a las otras especies estudiadas.

**Figura 25.**

*Ciclo vida de plantas*



Igualmente, según la **Figura 21** la fisiología de las plantas sigue un ciclo de vida mediante diferentes procesos e interacciones. En el girasol este mecanismo sucede más acelerado debido a su tiempo de vida útil, este también posee una reproducción alógama, es decir, la polinización es mayoritariamente cruzada; sólo una pequeña parte de los frutos (aquenios) se obtiene por autofecundación, ya que el girasol posee mecanismos fisiológicos de autoincompatibilidad. Además, el polen del girasol necesita ser transportado por el viento y mediante polinización, requiriendo de insectos polinizadores, (abejas principalmente), derivando en un problema debido a las características donde se desarrolló el estudio [34]

Aguilar (2010), publica que el girasol (*Helianthus annuus*) se acopla muy bien al terreno, aprovechando los elementos nutritivos disponibles, extrayendo cantidades relativamente importantes de nitrógeno, fósforo y potasio, agotando en muchos casos suelos bien provistos. No es una planta muy exigente en cuanto a calidad del suelo se refiere. Crece en la mayoría de los estratos, aunque prefiere terrenos arcillo – arenosos con buen drenaje [46]

Por otro lado, se debe tener en cuenta el estado en el que partieron las especies, fue desde la germinación de semillas. Aquí la raíz se desarrolla a partir del meristemo primario radicular y se genera un avance en el suelo por medio de división celular anticlinal (perpendicular a la dirección de la raíz) y filas de células unidireccionales. En la raíz que se pueden definir cuatro zonas de desarrollo: [33]

- Columela: región central de la caliptra.
- Zona meristemática: zona de máxima división celular.
- Zona de elongación: en que las células se expanden rápidamente. La división celular es menor pero el crecimiento mucho mayor.
- Zona de maduración: el crecimiento celular es mucho menor y las células comienzan a especializarse. [33]

Gracias a ese desarrollo de las zonas específicas de la raíz, en especial el de la zona de maduración y la meristemática, se puede inferir que unas de las razones del éxito de la fitorremediación desde semillas es por causa de la generación de células y tejido especializados, que tiene lugar gracias a los procesos químicos relacionados con las hormonas vegetales.

Otras condiciones fisiológicas que afectan la acción de las plantas son la densidad de suelo adecuada, temperatura del suelo superior a 15°C, semilla uniforme en tamaño, de buen vigor, energía y poder germinativos, y finalmente, una labor de siembra que asegure una correcta colocación de la semilla y del fertilizante.[50]

**Tabla 15.**

*pH y % Humedad*

<b>Nombre</b>	<b>pH</b>	<b>% Humedad</b>
Suelos contaminados con petróleo provenientes de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo	7,22	21,75%
Suelos contaminados con petróleo provenientes de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá	7,51	52,903%

**Nota.** Datos de pH y % humedad obtenidos de experimentación.

Basados en la **Tabla 15** y según la normatividad Lousiana 29B de la **Tabla 18** podemos evidenciar datos de pH dentro del rango aceptable y con tendencia muy ligera a la alcalinidad en ambos tipos de suelo propia de los suelos del Complejo Aerico Fluvaquents – Misceláneo Arenoso y los suelos Chromic Hapluderts. Por otro lado los porcentajes de humedad discrepan bastante cuando comparamos el suelo seco con un 21,75% y el suelo proveniente de la ciénaga, esto es debido a que el suelo proveniente de la ciénaga cuenta con un 52,903% de humedad (calculada en laboratorio y por eso puede existir algún tipo de error experimental o humano) lo que sale del rango aceptable por la norma Lousiana 29B por lo que se cree que su alto valor de %H (humedad) se da por las condiciones a las que se tomaron el suelo de la ciénaga. Cabe recalcar, que estos dos parámetros fueron calculados debido a que se quería conocer los tipos de suelo trabajados y por lo tanto no hicieron parte del diseño de experimentos, pero que asimismo fueron importantes para cálculos como Corg (Carbono orgánico) y parámetros necesarios para llevar a cabo el diseño de experimentos.

**Tabla 16.***Resultados TPH*

TPH inicial	TPH final
TPH suelos contaminados con petróleo provenientes de suelo a 20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169 del Campo Velasquez de Mansarovar ubicado en la cuenca del río Magdalena en Puerto Boyacá:  2.09%	TPH final luego de la siembra de <b><i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i></b>  1,61%
	TPH final luego de la siembra de <b><i>HELIANTBUS ANNUUS L</i></b>  0,74%
	TPH final luego de la siembra de <b><i>TRITICUM AESTIVUM</i></b>  1,02%
TPH suelos contaminados con petróleo provenientes de la ciénaga Palagua ubicada en Puerto Boyacá:  0,77%	TPH final luego de la siembra de <b><i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i></b>  0,22%
	TPH final luego de la siembra de <b><i>HELIANTBUS ANNUUS L</i></b>  0,41%
	TPH final luego de la siembra de <b><i>TRITICUM AESTIVUM</i></b>  0,6%

**Nota.** Comparación de datos de TPH iniciales vs finales.

La **Tabla 16** muestra la variación en los valores de TPH debido a la remediación de cada tipo de especie. Se evidencia que todas las especies contribuyeron a una reducción de TPH llegando en algunos casos a cumplir con la normatividad Louisiana 29B, la cual estipula un valor de TPH en suelos máximo de 1%, más adelante se analizarán los datos obtenidos mediante gráficas y porcentajes de disminución.

**Tabla 17.***Normatividad Louisiana 29B*

Parámetro	Valor aceptado
Arsénico	10 ppm
Bario	20.000 ppm
Cadmio	10 ppm
Cromo +6	500 ppm
Plomo	500 ppm
Mercurio	10 ppm
Selenio	10 ppm
Plata 200 ppm	200 ppm
Zinc	500 ppm
<b><i>Hidrocarburos totales de petróleo</i></b>	10.000 ppm (1%)
Aceites y grasas	< 1% peso en seco
Conductividad eléctrica	< 4 µmhos/cm
Relación Absorción de Sodio (RAS)	<12%
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PIS)	<15%
<b><i>pH</i></b>	6 a 9
<b><i>Contenido de humedad</i></b>	<50% en peso

**Nota:** Descripción de los factores experimentales contemplados por la norma Louisiana 29B. Tomado de: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1001: Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio, 2010. (25, mayo).

**Tabla 18.***Normatividad vs datos experimentales*

Parámetro	Dato Norma Louisiana 29B	Datos antes de fitorremediar		Dato suelo seco proveniente del Oleoducto VEL-169 (Final)	Dato del suelo húmedo proveniente de la ciénaga Palagua (Final)
TPH	10.000 ppm (1%)	Suelo seco 2,09%	Suelo húmedo 0,77%	<i>MEGATHYRSUS</i> <i>MAXIMUS</i> 1,61%	<i>MEGATHYRSUS</i> <i>MAXIMUS</i> 0,22%

**Continuación Tabla 18**

			<i>HELIANTHUS ANNUUS L</i> 0,74%	<i>HELIANTHUS ANNUUS L</i> 0,41%
			<i>TRITICUM AESTIVUM</i> 1,02%	<i>TRITICUM AESTIVUM</i> 0,6%
pH	6 a 9	-----	7,22	7,51
Contenido de humedad	< 50% peso	-----	21,75%	52,903%

**Nota.** Comparación de los datos de las variables basados en la norma Louisiana 23B vs experimentación.

Basados en los valores de la **Tabla 18** (Normatividad vs datos experimentales) se evidencian variaciones en el cumplimiento de la normatividad para ambos suelos; Para el suelo seco (20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169) se ven datos normales de pH y % humedad debido a que se encuentran en los rangos estipulados, mientras que el valor del TPH es muy alto, superando el 1% aceptable. Cabe recalcar, que la única especie capaz de llevar el suelo seco a estados normales fue el girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* que disminuyó el valor de TPH de un 2,02% a un 0,74% por lo tanto hace cumplir la normatividad.

Por otro lado, el suelo húmedo (ciénaga Palagua) tiene datos normales en TPH y pH, pero presenta problemas en el porcentaje de humedad que supera ligeramente el 50% en peso propuesto por la norma.

Además, con los datos de la **Tabla 16** se puede calcular el porcentaje de remediación mediante la cuantificación de la disminución de TPH. La disminución de TPH representa remediación debido a que a menores cantidades de TPH en suelos menor cantidad de hidrocarburos habrá y por lo tanto la contaminación se dará en menor medida:

**Ecuación 4.** % Remediación

$$\% \text{Especie remediación} = 100 - \frac{\text{TPH final} * 100\%}{\text{TPH inicial}}$$

$$\%Pasto = 100 - \frac{1.61 * 100\%}{2.09} = 22.967\%$$

**Tabla 19.**

*% Remediación TPH por especie*

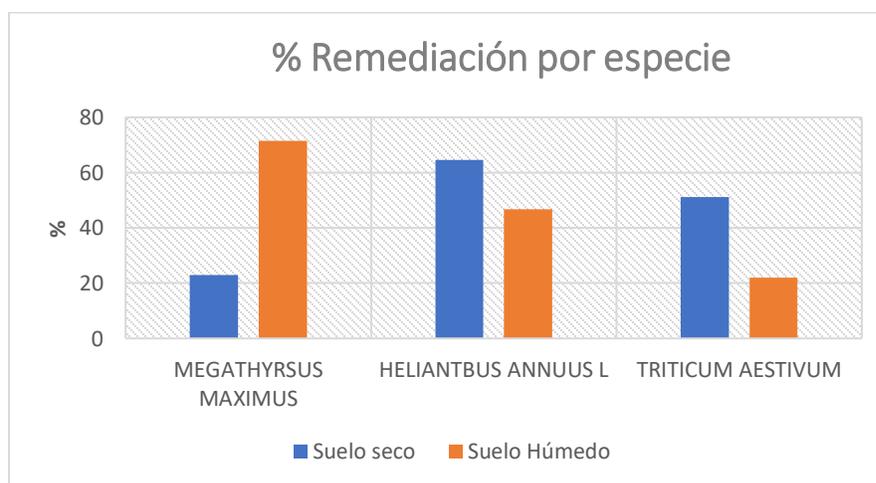
Tipo de suelo / % Remediación	<i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i>	<i>HELIANTBUS ANNUUS L</i>	<i>TRITICUM AESTIVUM</i>
Suelo seco (20 cm de profundidad en el Oleoducto VEL-169)	22.967	64.593	51.196
Suelo Húmedo (ciénaga Palagua)	71.429	46.753	22.078

**Nota.** % de remediación por cada tipo de especie y según el tipo de suelo.

La **Tabla 19** muestra la remediación en porcentaje de TPH por cada especie estudiada demostrando que cada especie actúa según el tipo de suelo que se quiera remediar como se ve en la tabla el pasto fue por mucho más efectivo en el suelo proveniente de la ciénaga con un porcentaje de remediación de 71.429% mientras que el girasol fue más efectivo en el suelo seco con un 64.593% de remediación, cabe recalcar, que se logró el objetivo de demostrar que las 3 especies son capaces de remediar los suelos.

**Figura 26.**

*% Remediación especie-suelo*



**Nota.** Gráfica de la cuantificación de la remediación.

Igualmente se puede calcular el promedio de remediación por especie:

**Tabla 20.** Promedio de remediación por especie

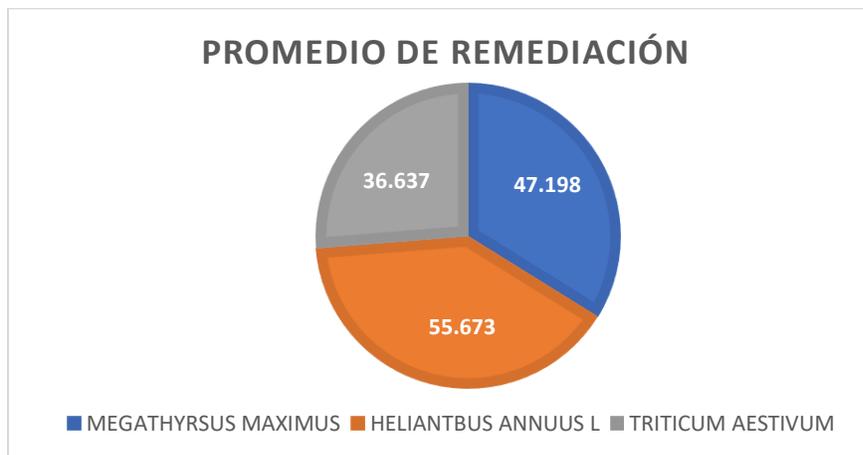
	<i>MEGATHYRSUS MAXIMUS</i>	<i>HELIANTBUS ANNUUS L</i>	<i>TRITICUM AESTIVUM</i>
<b>Promedio de Remediación (%)</b>	47.198	55.673	36.637

**Nota.** Valor del promedio de remediación por especie.

La **Tabla 20** muestra el porcentaje global de remediación presentado por cada especie luego de 4 meses de remediación resaltando el girasol *HELIANTBUS ANNUUS L* con un 55.673%.

**Figura 27.**

*Promedio de remediación por especie en %.*



**Nota.** Gráfica tipo torta de la remediación por especie en %.

Basado en las pruebas experimentales realizadas a lo largo del proyecto se evidencia una remediación evidente de aproximadamente 46,502% global entre todas las especies. Para el suelo seco la remediación fue de 46,242% y para el suelo húmedo proveniente de la ciénaga Palagua fue de 46,753%. Se puede observar en la **Figura 27** que la especie más destacada para el suelo húmedo fue el pasto *MEGATHYRSUS MAXIMUS* con un porcentaje cercano al 70%, seguido por el girasol con 45% y por último el trigo con 22% aproximadamente. Por otro lado, para el suelo seco

proveniente del Oleoducto VEL-169 la especie sobresaliente fue el girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* con un 65 % de remediación, seguido del trigo con un 51% y finalmente el pasto con un 23%.

Ahora bien, si sacamos el promedio de remediación, la especie más destacada fue el girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* con 55.673% de disminución, seguido por el pasto *MEGATHYRSUS MAXIMUS* con 47.198% y en último lugar el trigo *TRITICUM AESTIVUM* con un 36.637%.

Cabe destacar que la especie más viable económicamente para este tipo de tratamientos es el pasto *MEGATHYRSUS MAXIMUS*, debido a que los costos de implementación y sostenimiento son menores respecto al girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* como por ejemplo la demanda de agua (dos veces al día) y sustratos es mayor para el girasol y la cantidad de semillas por paquete es superior. Igualmente, para el girasol se necesita mayor cantidad de cuidados y su vida útil es de 3 meses, pero en lo que a remediación se refiere podemos evidenciar que la especie más efectiva es el girasol *HELIANTHUS ANNUUS L*, por lo que es válido decir que la eficiencia de cada especie depende de los requerimientos solicitados.

Finalmente, es necesario decir que los datos pueden variar por errores de los experimentadores y también como solo se realizó una única corrida experimental para el TPH, la certeza no es del 100% además contando errores como cambios en los nombres o datos desfasados.

**Tabla 21.**

*COT*

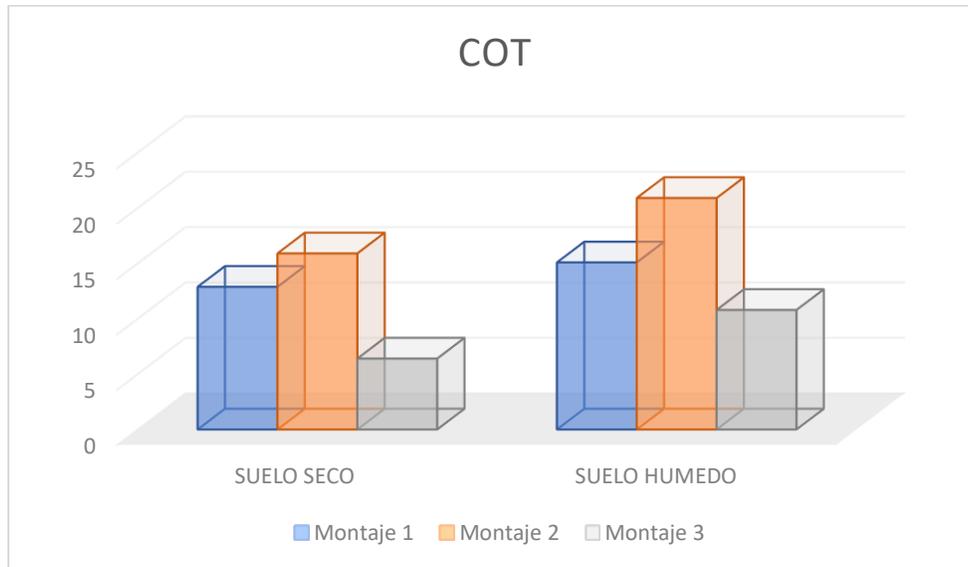
	MUESTRA 1 (SUELO PROVENIENTE DE UN SUELO SECO CERCANO A OLEODUCTO)	MUESTRA 2 (SUELO PROVENIENTE DE UN SISTEMA ACUOSO CERCANO A OLEODUCTO)
Montaje 1	12.88%	15.08%
Montaje 2	15.9%	20.9%
Montaje 3	6.4%	10.79%

**Nota.** % de COT por cada tipo de suelo.

La **Tabla 21** muestra los porcentajes de carbono orgánico presentes en los suelos contaminados con petróleo con el fin de hacer su respectivo análisis.

**Figura 28.**

*Resultados COT*



**Nota.** Gráfica de barras en 3D de la cantidad en % de COT presente en los suelos estudiados.

**Tabla 22.**

*PROMEDIO COT*

MUESTRA 1 (SUELO PROVENIENTE DE UN SUELO SECO CERCANO A OLEODUCTO)	MUESTRA 2 (SUELO PROVENIENTE DE UN SISTEMA ACUOSO CERCANO A OLEODUCTO)
11.73%	15.6%

**Nota.** Dato de porcentaje promedio de COT por cada tipo de suelo.

Basados en la experimentación para la determinación de carbono orgánica total (COT) se evidencia que los suelos tienen porcentajes relativamente normales con respecto a la teoría (0-50%), además de que los suelos son tipo arcilloso-arenoso. Según la **Tabla 23** se puede ver un porcentaje mayor para el suelo húmedo debido a que bajo el agua se puede obtener mayor cantidad de nutrientes y con tonalidades más oscuras. Este factor está directamente relacionado con la porosidad y permeabilidad permitiendo mayor flujo y retención de agua.

Finalmente, se puede evidenciar que el girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* es la especie más efectiva para la implementación del modelo de fitorremediación debido a que es la especie que más remedia con un 56,673% global de remediación, además de que no altera los valores como el pH, el porcentaje de humedad ni COT (datos necesarios para saber qué tipo de suelo se está tratando, además de ser importantes para la consecución del proyecto), por el lado del pH la especie no se ve afectada por la tendencia a la alcalinidad de los suelos, hablando de humedad según la teoría y la práctica se evidencia que la especie crece mejor en entornos con alto contenido de humedad y por lo tanto es viable para ambos tipos de suelo, resaltando el suelo seco que al tener menor contenido de agua presentó mayor remediación debido a la búsqueda de nutrientes del girasol, finalmente por el lado del COT es factible sembrar este tipo de especies de girasol debido a que no presentan problemas en crecer en entornos entre el 10 y 20% de COT y por lo tanto no se vio afectado el crecimiento de la planta.

Por otro lado, el pasto *MEGATHYRSUS MAXIMUS* es la opción más viable si se quiere remediar a bajos costos debido a que es mucho más barato que el girasol y su porcentaje de remediación es de 47.198% el cual es cercano a la especie que más remedia, por lo que su aplicación en la industria es la más viable. Además de esto el pasto no presentó problemas en su crecimiento debido al pH alcalino presentado en los suelos y se evidenció también que este tiende a crecer en mayor medida en ámbitos con una alta humedad lo cual se evidenció en la **Figura 26** en donde tuvo más del 70% en remediación en el suelo húmedo, lo que da a entender que esta es la especie ideal en zonas demasiado húmedas y suelos con bajos porcentajes de COT como se puede ver, ya que al haber valores relativamente bajos de COT no se presentaron problemas en el crecimiento del pasto, dando a entender que la especie es resistente y por lo tanto apta para fitorremediar.

Para finalizar tenemos al trigo *TRITICUM AESTIVUM* con un 36.637% de remediación total, el cual de las 3 especies fue el que menos remedió, pero que a pesar de todo tuvo datos muy favorables tanto de recuperación del suelo como de costos ya que no genera un gasto muy grande y la remediación cerca del 40% es factible si se desea que un suelo llegue a un punto en que se pueda auto remediar, por otro lado los estándares de pH alcalinos en los suelos no fueron un impedimento para que ésta especie fuera la que más presentara crecimiento en la rizosfera con un valor medio de 20 cm de altura superando en gran medida a las otras dos especies, lo que quiere

decir que es una especie apta para su aplicación en fitorremediación; Por el lado del COT no se presentaron problemas debido a la baja cantidad de este compuesto necesario, lo que quiere decir que el trigo puede crecer en suelos arcillosos, finalmente se evidencia una tendencia del trigo a crecer en entornos tanto de alta como de baja humedad por lo cual lo hace una buena especie de estudio en fitorremediaciones futuras.

## 8. CONCLUSIONES

Basados en la teoría se pudo comprender las características básicas de las especies propuestas (pasto (*Megathyrsus maximus*), el girasol (*Helianthus annuus l*) y el trigo (*triticum aestivum*)) como vida útil, humedad relativa, fertilización, riego, temperaturas, entre otros. Así mismo en la experimentación se comprendió la implementación de cada tipo de especie como sus características, coloración, tiempos de crecimiento, medida de la raíz, hoja y tallo.

De acuerdo con la recopilación teórica y el diseño experimental se lograron compilar los datos necesarios para poder caracterizar el suelo contaminado. El suelo estudiado tiene diferentes estratos de tierra, principalmente arcilla y arena, afectando directamente las medidas de TPH y COT.

Los datos de pH y COT se ajustaron a la normatividad para la cantidad de cada uno en suelos por cada tipo de suelo estudiado, mientras que para los valores de TPH el suelo seco solo se ajustó con la remediación por parte del girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* pasando de un 2,07% a un 0,74%, mientras que en suelos húmedos siempre hubo un valor permitido por la norma Louisiana 29B, finalmente el contenido de humedad presentó un valor por encima del 50% permitido, aunque es necesario decir que el desfase no es muy alto y por lo tanto se puede ajustar.

Los suelos que se trabajaron presentaron valores entre el 10 y el 20% de COT (Carbono orgánico) lo que quiere decir que en comparación a las tierras negras encontradas en bastantes zonas del país, este tipo de suelos no cuenta con una amplia gama de nutrientes que los hagan aptos para la agronomía, sin embargo las especies estudiadas crecieron sin problema logrando tener rizosfera entre 8 y 23 cm de largo lo que quiere decir que estas especies pueden crecer en entornos con pocos nutrientes y por lo tanto su factibilidad en la aplicación de la fitorremediación se demuestra, por otro lado, los valores de COT se encuentran entre los estipulados (menores al 50%) y por lo tanto no existen problemas con normatividad ambiental.

A pesar de que la cantidad de TPH disminuyó en mayor medida con la implementación del girasol *HELIANTHUS ANNUUS L*, con porcentajes mayores al 50%, se determina que la especie más eficiente es el pasto *MEGATHYRSUS MAXIMUS* debido a que fitorremedia alrededor del 50%, es más económico, fácil de tratar, con una vida útil mayor y con menores gastos de mantenimiento. Cabe recalcar que todas las especies estudiadas en el proyecto crecieron satisfactoriamente y lograron fitorremediar con éxito, lo cual da pie a futuras implementaciones a mayor escala.

Basados en la **Tabla 19** se puede evidenciar que la fitorremediación depende del tipo de suelo que se está tratando, como se puede ver el girasol *HELIANTHUS ANNUUS L* superó en gran medida las otras dos especies estudiadas con un 64.593% de remediación dando a entender que ésta especie tiende a ser más efectiva en zonas con poca humedad, pero también dando valores factibles en zonas húmedas con una remediación del 46.753%. Por otro lado, tenemos que en suelos con humedades altas el pasto fue la especie más efectiva con un porcentaje de remediación de 71.429% significativamente más alto que el valor de las otras dos especies y por el contrario presenciando un valor relativamente bajo en suelos con poca humedad con un 22.967%, lo cual puede compensarse con los bajos costos de la implementación de este tipo de especie.

Según la **Tabla 18** los datos de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) obtenidos después de la remediación demuestran una notable baja en la carga orgánica en los suelos, pero en algunos casos sin lograr llegar hasta lo permitido por la norma Louisiana 29B la cual estipula un máximo de 1% de TPH en suelos. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se decidió aclarar que esto puede ser debido a los tiempos de fitorremediación, debido a que en 4 meses las plántulas tanto de trigo como de pasto no lograron llegar al tope de crecimiento de la rizosfera y por lo tanto no se completó el ciclo de remediación, lo que quiere decir que los datos de disminución de TPH pueden variar en un tiempo de remediación mayor, por otro lado el girasol si logró completar dicho ciclo debido a que llegó a su fase de muerte por alta carga orgánica.

Cuando se habla de costos netos de implementación, se evidencia la factibilidad económica de la fitorremediación, debido a que las plantas trabajadas poseen un rango económico relativamente bajo tanto en la siembra como en la manutención. El costo total del proyecto fue de 1.205.635 COP para fines de laboratorio como se puede evidenciar en la **Tabla 11**. Si comparamos con los surfactantes investigados los cuales tienen un costo de alrededor de 200 USD/Kg fue un costo relativamente bajo.

Los costos que se asumieron reales varían dependiendo de las dimensiones y características del terreno. Se estimó un área de 100x20 m para simular la aplicación de un escenario real generando un costo total de 109.429.907 COP, dándonos un valor aproximado por metro cuadrado de 54.715 COP reforzando la factibilidad del uso de esta técnica. Se disminuye por lo menos 10 veces el costo de remediación por surfactantes (200 USD/Kg)

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arenas Piza,D., (-02-282018). "Proceso de biodegradación para el tratamiento de derrames de petróleo por medio de pseudomonas." Available: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7130>.
- [2] ENAP, «Glosario,» ENAP, 2021. [En línea]. Available: <https://www.enap.cl/pag/232/1012>.
- [3] Rae, «petróleo,» Rae, 2021. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/petr%C3%B3leo>.
- [4] R. Dinero, «ecopetrol activa plan de contingencia por nuevo atentado a Caño Limón Coveñas,» Revista Dinero, 14 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.dinero.com/pais/articulo/ecopetrol-activa-plan-de-contingencia-por-nuevo-atentado-a-cano-limon-covenas/268332>. [Último acceso: 29 Agosto 2020].
- [5]Alibaba, «Alibaba,» 02 Octubre 2020. [En línea]. Available: [https://spanish.alibaba.com/promotion/promotion\\_hedta-promotion-list.html](https://spanish.alibaba.com/promotion/promotion_hedta-promotion-list.html). [Último acceso: 02 Octubre 2020].
- [6] A. Delgadillo, C. González , F. Prieto, J. Villagómez y O. Acevedo, «fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación,» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, p. 16, 2011.
- [7] S. Mazparrote, homeostasis y el equilibrio de la naturaleza, Natura (Venezuela), 1976.
- [8] E. Pilon, «phytoremediation,» *Biology Department, Colorado State University*, p. 27, 2005.
- [9] D. Miranda y R. Restrepo, «los derrames de petroleo en ecosistemas- impactos, consecuencias y prevencion. la experiencia de colombia,» p. 6, 2005.
- [10] J. León, «una mirada a la fitorremediacion en latinoamerica,» *Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD-*, p. 83, 2017.

- [11] MedlinePlus-Biblioteca de medicina de los EEUU, «Derrame de petróleo,» MedlinePlus-Biblioteca de medicina de los EEUU, 16 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://medlineplus.gov/spanish/oilspills.html>
- [12] J. A. Velazquez Arias, «Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación,» *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, p. 19, Junio 2017.
- [13] Oil channel, «anuncian tragedia ambiental en puerto boyacá por derrame de petróleo,» oil channel, 25 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.oilchannel.tv/noticias/anuncian-tragedia-ambiental-en-puerto-boyaca-por-derrame-de-petroleo>
- [14] T. P. Ibarra, «En Colombia se han derramado 3,7 millones de barriles de crudo,» El tiempo.com, 20 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/cifras-de-derrames-de-crudo-en-colombia-en-los-ultimos-anos-207664>. [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [15] Semana, «Oleoductos de Ecopetrol han sufrido 27 atentados en lo que va del 2020,» Semana, 31 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/economia/articulo/cuantos-atentados-ha-sufrido-ecopetrol-en-2020/287345/>.
- [16] C. Tejedor (2006, Ene 10). Biorremediación [Online]. [http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica\\_ambiental/biorremediacion.pdf](http://www3.uah.es/bioquimica/Tejedor/bioquimica_ambiental/biorremediacion.pdf)
- [17] Instituto nacional de ecologia y cambio climatico, «Tecnologías de remediación,» INECC, 15 Noviembre 2007. [En línea]. Available: [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html#:~:text=Entre%20las%20tecnolog%C3%ADas%20fisisoqu%C3%ADmicas%20para,estabilizaci%C3%B3n%20\(S%2FE](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html#:~:text=Entre%20las%20tecnolog%C3%ADas%20fisisoqu%C3%ADmicas%20para,estabilizaci%C3%B3n%20(S%2FE). [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [18] I. Valencia, G. Navas y C. Infante, «fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extra pesado con *Megathyrus maximus*,» *Universidad Central de Venezuela*, p. 9, Noviembre 2016.

- [19] V. A. Johana, "Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación", *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, No paginas 19, 2017
- [20] J. A. V. Arias, «Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación,» *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, p. 19, 2017.
- [21] Instituto nacional de ecología y cambio climático (2007, Nov 15). Tecnologías de remediación [Online].  
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html>
- [22] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, «Reseña Toxicológica de Hidrocarburos totales de petróleo (TPH),» Atlanta departamento de salud, 1998. [En línea]. Available: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts123.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.html). [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [23] M. I. O. Belmonte, «Cromatografía de gases,» Laboratorio de Técnicas Instrumentales, 2020. [En línea]. Available: <http://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/cromatografa-de-gases>. [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [24] C. Rodríguez, "Estudio de la técnica de Extracción Asistida por Microondas (MAE) para su aplicación en la determinación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH's) en suelos ," pp. 1-138.
- [25] Schlumberger, «Petroleo Pesado,» Schlumberger, 2020. [En línea]. Available: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/h/heavy\\_oil.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/h/heavy_oil.aspx). [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [26] L. ilzarbe izquierdo, m. tanco, e. viles y m. j. álvarez sánchezarjona, «EI diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta,» *Universidad Distrital Francisco José de Caldas Tecnura*, Vols. %1 de %2Tecnura, vol. 10, pp. 127-138, 2007.

- [27] Secretaria del senado, «Ley 99 1993,» Secretaria del senado, 22 Diciembre 1993. [En línea]. Available: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0099\\_1993.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html). [Último acceso: 11 Noviembre 2020].
- [28] Grupo de asuntos internacionales marítimos de dimar, «procedimientos y normas internacionales aplicables en caso de accidentes de contaminación por derrames de hidrocarburos, en los espacios marítimos jurisdiccionales colombianos,» grupo de asuntos internacionales marítimos de dimar, Abril 2015. [En línea]. Available: [https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/2.\\_jurisdiccion\\_maritima.pdf](https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/2._jurisdiccion_maritima.pdf). [Último acceso: 12 Noviembre 2020]
- [29] Minambiente, «Minambiente establece el formato único para el reporte de contingencias ambientales,» Minambiente, 2020. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/decretos?id=2093>. [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [30] minambiente, "0a-decreto 050, Minambiente, 2018. [En línea]. Available: " <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/0a-decreto%20050.pdf>
- [31]minambiente, "55-Res 1209 de 2018," Available: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/55-Res%201209%20de%202018.pdf>.
- [32] Minambiente, «Minambiente establece el formato único para el reporte de contingencias ambientales,» Minambiente, 2020. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/4097-minambiente-establece-el-formato-unico-para-el-reporte-de-contingencias-ambientales>. [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [33] W. Alegria, "texto básico para profesional en ingeniería forestal. en el área de fisiología vegetal," *Fcf-Unap*, 2016.
- [34] J. Gómez-Arnau, "el cultivo del girasol," *Centro De Investigación Agrícola 41209 Torre De La Reina (Sevilla)*, 1988.

- [35] Guía del Cultivo del Girasol José Rafael García Ruiz y Javier García López – Córdoba. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2016. 1-58 p. Formato digital (e-book) – (Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria) Girasol – Desarrollo y Necesidades del cultivo -Enfermedades y Plagas.
- [36] M. C. Domingo *et al*, "manejo de pasto Facultad de Ciencia Animal Managua, Nicaragua." *Universidad Nacional Agraria*, 2005. Available: <https://cenida.una.edu.ni/textos/nf01u58mp.pdf>.
- [37] R. Patiño, "Calidad nutricional de Mombasa y Tanzania (*Megathyrus maximus*, Jacq.) manejados a diferentes frecuencias y alturas de corte en Sucre, Colombia," *Universidad Ces*, pp. 17-30,
- [38] Borja, J., .2019."caracterización morfofenológica de una colección de *megathyrus maximus* en el valle del patia – cauca." Universidad del cauca.
- [39] Secico, «biología de cultivos anuales» Pontifica Universidad Católica de Chile, 2009. [En línea]. Available: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/cultivos/index.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/index.html). [Último acceso: 2021 Julio 27].
- [40] Schlumberger, «Glossary oilfield,» Schlumberger, 2009. [En línea]. Available: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/api\\_gravity.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/api_gravity.aspx). [Último acceso: 2020 Octubre 08].
- [41] Ministerio de Minas y Energía, «Perfiles-Crudo,» eiticolombia, 2017. [En línea]. Available: <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2077/perfiles-hidrocarburos/perfiles-crudo/>.
- [42] M. A. R. Serna, «reducción de la viscosidad de crudos pesados mediante la aplicación de nanofluidos en procesos no térmicos,» Universidad Nacional de Colombia, [En línea]. Available: <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=34935>.
- [43] A. F. Peralta Sanchez, J. D. Blanco Sanchez, J. F. Reina Gonzalez y L. E. Mantilla Ramirez, «transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos,» Revista Fuentes: El

- Reventón Energético, 2017. [En línea]. Available: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/7675/8920>.
- [44] Mansarovar Energy, «Transporte- Mansarovar Energy,» Mansarovar Energy, 2021. [En línea]. Available: <http://www.mansarovar.com.co/operaciones/cadena-de-valor/transporte>.
- [45] Homecenter, «Homecenter,» 04 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/25655/Plantatierra-15-kilos/25655>. [Último acceso: 04 Octubre 2020].
- [46] M Pons-Jiménez *et al*, (Apr 01,2011)."extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petroleo en suelos con características físicas y químicas diferentes/Removal of oil and petroleum compounds from soils with different physical and chemical characteristics." *Universidad Y Ciencia*. Available: <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v27n1/v27n1a1.pdf>.
- [47] U. C. D. V. L. D. M. D. Suelos, «humedad.doc,» escuela de ingeniería en construcción-laboratorio de mecánica de suelos, Valparaíso.
- [48] Métodos analíticos del laboratorio de suelos / Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Adriana Mireya Zamudio Sánchez ... [et al.] . -- 6a ed. . -- Bogotá : Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2006 . -- xxiii, 648 p. : il., mapas, fotos ; 28 cm
- [49] Colombia.generatordeprecios, «colombia.generatordeprecios.,» colombia.generatordeprecios., 2021. [En línea]. Available: [http://www.colombia.generatordeprecios.info/obra\\_nueva/Urbanizacion\\_interior\\_del\\_terreno/Jardineria/Acondicionamiento\\_del\\_terreno/Riego.html](http://www.colombia.generatordeprecios.info/obra_nueva/Urbanizacion_interior_del_terreno/Jardineria/Acondicionamiento_del_terreno/Riego.html).
- [50] Aguilar, J. 2 010. El cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) para flor cortada. (En línea). Consultado el 20 de Noviembre del 2013. Disponible en: <http://www.bionica.info/biblioteca/Melgares%202001%20girasol.PDF>.
- [51] L. A. N. Aguirrezábal *et al*, *Girasol: Aspectos Fisiológicos Que Determinan El Rendimiento*. Buenos Aires-Argentina: Unidad Integrada Balcarce, 2001

- [52] Calderón Castillo, A. and C. A. Sandoval Saavedra, (-02-152021). "Evaluación de la eficiencia de un piloto de fitorremediación multiproceso en el tratamiento de suelos contaminados con residuos del Campo Rubiales bajo el marco regulatorio Louisiana 29B." *Evaluation of the Efficiency of a Multiprocess Phytoremediation Pilot in the Treatment of Soils Contaminated with Rubiales Field Residues Under the Louisiana 29B Regulatory Framework*. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8258>.
- [53] A. Delgadillo, C. González, F. Prieto, J. Villagómez y O. Acevedo, «fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación,» *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, p. 16, 2011.
- [54] N. Fernandez, *Propiedades de los crudos*, Bogota: Fundacion Universidad America, 2020.
- [55] Ecopetrol, «Normas de Ingeniería de Oleoductos,» de *plan de contingencia*, 1997, p. 5.
- [56] ANH, «proceso permanente de asignación de áreas,» de *delimitación y clasificación de las áreas del proceso de*, p. 10.
- [57] Schlumberger, «Glossary oilfield,» Schlumberger, 2009. [En línea]. Available: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/asphaltenes.aspx>. [Último acceso: 9 Octubre 2020].
- [58] G. Vela Correa, J. López Blanco y M. d. L. Rodríguez Gamiño, «Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México,» *scielo*, Abril 2012.
- [59] E. Pilon, «phytoremediation,» *Biology Department, Colorado State University*, p. 27, 2005.
- [60] L. Ilzarbe izquierdo, m. tanco, e. viles y m. j. álvarez sánchezarjona, «El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta,» *Universidad Distrital Francisco José de Caldas Tecnura*, Vols. %1 de %2Tecnura, vol. 10, pp. 127-138, 2007

- [61] Secretaria del senado, «Ley 99 1993,» Secretaria del senado, 22 Diciembre 1993. [En línea]. Available: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0099\\_1993.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html). [Último acceso: 11 Noviembre 2020].
- [62] Grupo de asuntos internacionales marítimos de dimar, «procedimientos y normas internacionales aplicables en caso de accidentes de contaminación por derrames de hidrocarburos, en los espacios marítimos jurisdiccionales colombianos,» grupo de asuntos internacionales marítimos de dimar, Abril 2015. [En línea]. Available: [https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/2.\\_jurisdiccion\\_maritima.pdf](https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/2._jurisdiccion_maritima.pdf). [Último acceso: 12 Noviembre 2020].
- [63] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 1001: Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio, 2010. (25, mayo).
- [64] “Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Boyacá”, Iván Darío Gómez Guzmán, Tomo 1, Departamento administrativo Nacional de Estadística, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá d.c, 2005. <http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf>
- [65] Google. (s.f.). [Indicaciones de Google Maps para llegar al conjunto residencial Rincón de San pedro]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/place/Conjunto+Residencial+Rinc%C3%B3n+de+San+Pedro/@4.8197813,-74.0764527,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3f865659b4ec6b:0xa4ebabfa72141080!8m2!3d4.819776!4d-74.074264?hl=es> [Acceso: abril 10, 2021]
- [66] [15] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

## GLOSARIO

**ABSORCIÓN:** características que presentan algunos fluidos para lograr retener fluidos.[1]

**BIORREMEDIACIÓN:** procedimiento por el cual se degradan contaminantes como hidrocarburos, metales pesados o insecticidas presentes en sólidos o aguas residuales, usando microorganismos, plantas o enzimas.

**BS&W:** el BSW corresponde al contenido de agua libre (no disuelta) y sedimentos (limo, arena) que trae el crudo. Es importante que su valor sea bajo, para evitar suciedades y dificultades durante el procesamiento del crudo, al vaporizarse el agua libre que pueden dañar el horno. Se informa como porcentaje en volumen sobre el crudo [2]

**CAMPO:** zona en la que se realiza la extracción de hidrocarburos del subsuelo que representa la proyección en superficie del yacimiento subterráneo explotado.

**CRUDO:** se refiere al petróleo natural, es decir, que no ha sufrido cambios como consecuencia de la extracción y conserva sus propiedades originales en el subsuelo. [1]

**DEGRADACIÓN:** es la descomposición de cualquier compuesto o material, generada por el rompimiento de las moléculas de su estructura, por efecto de la luz solar, presencia de oxígeno, calor y la acción de algunos microorganismos. [1]

**FORMACIÓN:** es la unidad geológica porosa y permeable capaz de almacenar hidrocarburos

**OLEODUCTO:** tubería utilizada para el transporte de hidrocarburos líquidos en condiciones de comercialización, por su bajo contenido de agua y sedimentos

**PETRÓLEO:** líquido natural oleaginoso e inflamable, constituido por una mezcla de hidrocarburos, que se extrae de lechos geológicos continentales o marítimos y del que se obtienen productos utilizables con fines energéticos o industriales, como la gasolina, el queroseno o el gasóleo [3]

**YACIMIENTO:** unidad geológica que exhibe un grado suficiente de porosidad y permeabilidad para almacenar y transmitir fluidos. Las rocas sedimentarias son las rocas yacimiento más comunes porque poseen más porosidad que la materia de las rocas ígneas o metamórficas y se forman bajo condiciones de temperatura en las cuales los hidrocarburos pueden ser preservados. Un yacimiento es un componente crítico de un sistema petrolero completo. [1]

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1. RECOMENDACIONES**

- Se sugiere realizar el estudio de las especies con un tiempo mínimo de 6 meses debido a que para este proyecto fue de 4 meses y las especies de pasto y trigo no completaron el ciclo de remediación, por lo que se recomienda hacer un estudio basado en mínimo 6 meses y una experimentación de mayor cantidad de parámetros.
- Se recomienda hacer una relación de costos y benéficos presentados por cada tipo de especie trabajada, además de tener un balance real de la aplicación del proyecto en tiempos proyectados de mes a mes.
- Es pertinente considerar en el desarrollo de futuros proyectos de investigación, el análisis SARA de petróleos pesados debido a que es una técnica que considera la solubilidad de diferentes especies de peso molecular dentro del mismo crudo, ayudando a realizar un análisis más profundo.
- Finalmente se recomienda buscar una mayor cantidad de información sobre otros tipos de plantas que remedien, además de una normatividad nacional e internacional que ayude a soportar los datos obtenidos por laboratorio.

## ANEXO 2. RESEÑA FOTOGRÁFICA TOMA DE MUESTRAS

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD
	<p>El 6 de marzo de 2021 se procedió a tomar las muestras en el campo Velásquez de Puerto Boyacá</p>
	<p>Se visitó diferentes pozos y áreas del campo para la toma de muestras.</p>
	<p>El ingeniero que nos mostró el lugar nos indicó que generalmente cuando ocurre un derrame se hace un barrido superficial, por lo que las zonas cercanas no presentaban tazas de derrames</p>



Sé tomaron las muestras de tierra seca de zonas donde los habitantes indicaron que había un derrame. (Muestras tierra seca)



Igualmente, se tomaron muestras de una ciénaga donde era evidente el derrame, y que, según un habitante del sector, era una problemática de hace un tiempo que había sido ocurrido por una falla técnica de un oleoducto. Además, él nos indicó su inconformidad y que “la empresa operadora había hecho una remediación a medias”.



(Muestras tierra húmeda)



A pesar de que se tomaron muestras de suelo contaminado, se decidió conseguir muestras de crudo extras para derramar el suelo con el objetivo de verdaderamente evidenciar la presencia de hidrocarburos y evitar errores por filtración preferencial de suelo o asentamientos selectivos,

### ANEXO 3. RESEÑA FOTOGRÁFICA DE EXPERIMENTACIÓN DE PLANTAS

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD/MES
 <p>The first photograph shows a hand holding a packet of sunflower seeds. The packet is labeled 'ROOTS 5.000 GIRASOL FLOR GIGANTE AMARILLA' and 'SEMILLAS FLORES'. The second photograph shows a clear plastic bag filled with seeds, with a white label attached. The third photograph shows a yellow bag of fertilizer with the brand name 'SÁENZ FETY' and 'Pecuaria &amp; Agro desde 1963' printed on it.</p>	<p>El 7 de febrero de 2021 se procedió a la compra y siembra de semillas de las especies de estudio</p>



Se realizo una adecuación del sitio de experimentación y se sembraron las especies en suelo y en macetas.

Crecimiento trigo Mes 1



Crecimiento trigo mes y medio



Crecimiento trigo 2 Mes



Crecimiento trigo 3 Mes



Trigo al final del proyecto



Trigo expuesto a altas trazas de petróleo



Pasto Mes 1



Pasto Mes 2



Pasto Mes 3



Pasto al final del proyecto en maceta



Pasto al final del proyecto



Pasto contaminado con petróleo



Girasol Mes 1



Girasol Mes y medio



Girasol Mes 2



Girasol Mes 3



Girasol al final del proyecto



Girasol contaminado con petróleo



Siempre d plántulas adicionales por muerte precipitada



Cerramiento realizado para adecuación del terreno



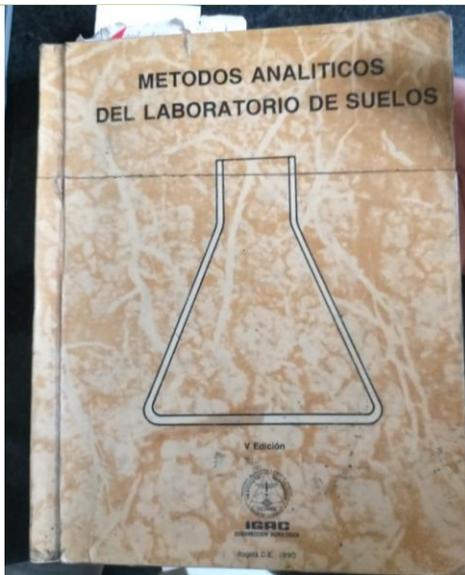
Adición de fertilizantes y abonos (mensualmente)

#### ANEXO 4. PRUEBAS DE LABORATORIO

REGISTRO FOTOGRÁFICO	ACTIVIDAD
	<p>El 15 de marzo de 2021 se procedió en las instalaciones de la Universidad América a realizarse las pruebas de laboratorio</p>
 	<p>Las muestras de suelo obtenidas previamente se secaron en una mufla Binder a una temperatura menor de 100 °C para evitar la evaporación de los HC</p>



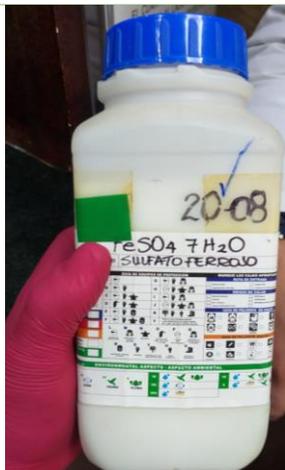
El 17 de marzo de 2021 se procedió a realizarse las pruebas experimentales de pH y % de Humedad



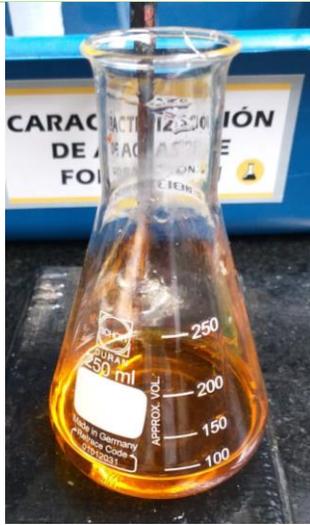
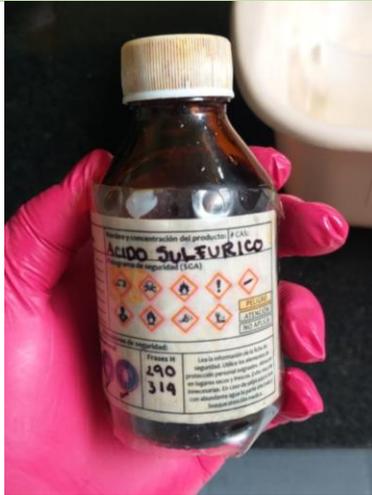
Se tomó como referencia el libro Métodos analíticos del laboratorio de suelos proporcionado por el docente Nelson Fernández



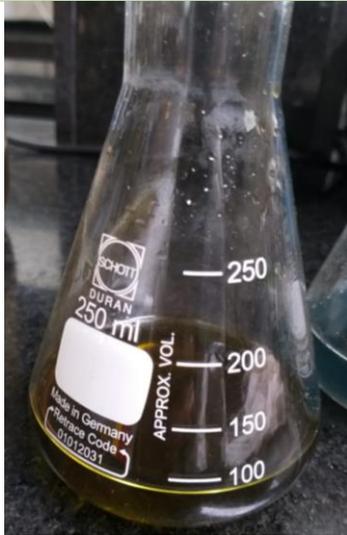
Los TPH de las muestras fueron calculados en el laboratorio IMA a cargo del docente Nelson Fernández



Químicos empleados para la determinación del Carbono orgánico

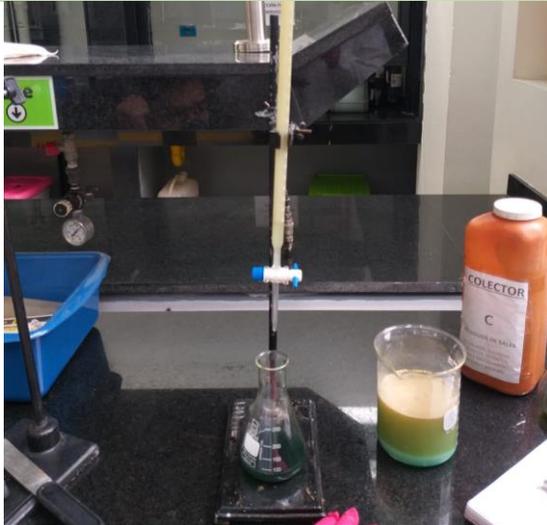


El 19 de marzo de 2021 se procedió a realizar la prueba de laboratorio para determinar COT



Muestras de suelo antes y después de titular con Sulfato Ferroso

Montaje de titulación realizado en las instalaciones de la universidad América



Cambio de tonalidad en suelo húmedo después de la titulación realizada.



Implementos de laboratorio utilizados

## ANEXO 5. INFORME DE PRUEBAS INICIALES TPH



Código: FLAB-07  
VERSION: 8  
Fecha: 2021/03/11

### INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

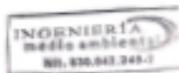
INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastián Pineda
Dirección:	Universidad De America
NIT:	
Contacto:	Sebastián Pineda
Teléfono:	3214704825
E-mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	<b>4460</b>
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	18/3/2021
Fecha y Hora de Recep:	18/3/2021 17:00
Lugar de Muestreo:	<b>SUELO 2 POZO CANAGUA</b>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	18/3/2021 a 30/3/2021

Resultado Análisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	0,77

S.M. :Standard Methods 2005 21<sup>a</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
Nelson Fernandez Barrero  
Director Laboratorio TP 4462 CPIQ



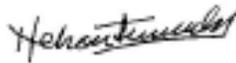
**INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO**

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastian Pineda
Dirección:	Universidad De America
NIT:	
Contacto:	Sebastian Pineda
Teléfono:	3214704825
E: mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	<b>4458</b>
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	18/3/2021
Fecha y Hora de Recep:	18/3/2021 17:00
Lugar de Muestreo:	<b>SUELO 1 TIERRA FIRME</b>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	18/3/2021 a 30/3/2021

Resultado Analítico			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	2,09

S.M. :Standard Methods 2005 21<sup>st</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
 El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
 SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
 Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
 Nelson Fernandez Barrero  
 Director Laboratorio TP 4452 CPIO



## ANEXO 6. INFORME DE PRUEBAS FINALES TPH



Código FLAB-07  
VERSION: 8  
Fecha 2021/03/11

### INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE			
Empresa:	Sebastian Pineda		
Dirección:	Universidad De America		
NR:			
Contacto:	Sebastian Pineda		
Teléfono:	3214704825		
E-mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>		
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá		
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA			
Muestra IMA No. :	<b>4604</b>		
Matriz:	suelo		
Responsable de Muestreo:	Cliente		
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.		
Procedimiento de Muestreo:	N.E.		
Tipo de Muestreo:	Puntual		
Fecha y Hora de Toma:	23/05/2021		
Fecha y Hora de Recep:	26/05/2021 11:30		
Lugar de Muestreo:	Giracol Suelo seco		
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá		
Fecha de Análisis	31/05/2021		
Resultado Analítico			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	0,41

S.M. :Standard Methods 2005 21<sup>a</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohíbe la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
Nelson Fernandez Barrero  
Director Laboratorio TP 4482 CPO



### INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

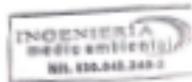
INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastian Pineda
Dirección:	Universidad De America
NI:	
Contacto:	Sebastian Pineda
Teléfono:	3214704825
E: mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4505
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	23/05/2021
Fecha y Hora de Recep:	26/05/2021 11:30
Lugar de Muestreo:	Giracol Suelo Cienaga
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	31/05/2021

Resultado Analítico			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	0,74

S.M. :Standard Methods 2005 21\*, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
 El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
 SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
 Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
 Nelson Fernandez Barrero  
 Director Laboratorio TP 4482 CP1Q



**INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO**

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastian Pineda
Dirección:	Universidad De America
Nit:	
Contacto:	Sebastian Pineda
Teléfono:	3214704825
E: mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	<b>4508</b>
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	23/05/2021
Fecha y Hora de Recop:	26/05/2021 11:30
Lugar de Muestreo:	<b>Trigo Suelo Cienaga</b>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	31/05/2021

Resultado Analítico			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	1,02

S.M. :Standard Methods 2005 21<sup>a</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
 El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
 SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
 Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
 Nelson Fernandez Barrero  
 Director Laboratorio TP 462 CPIO



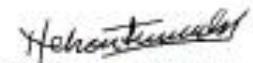
**INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO**

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastian Pineda
Dirección:	Universidad De America
NIT:	
Contacto:	Sebastian Pineda
Teléfono:	3214704825
E: mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	<b>4507</b>
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	23/05/2021
Fecha y Hora de Recop:	26/05/2021 11:30
Lugar de Muestreo:	Trigo suelo ceo
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	31/05/2021

Resultado Analisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	0,6

S.M. : Standard Methods 2005 21<sup>a</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
 El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
 SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
 Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
 Nelson Fernandez Barrero  
 Director Laboratorio TP 4402 CPIQ



### INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

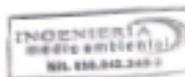
INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastian Pineda
Dirección:	Universidad De America
NIIT:	
Contacto:	Sebastian Pineda
Teléfono:	3214704825
E: mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	<b>4508</b>
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	23/05/2021
Fecha y Hora de Recop:	28/05/2021 11:30
Lugar de Muestreo:	Pácto de Suelo Cienaga
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	31/05/2021

Resultado Análisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	1,61

S.M. :Standard Methods 2005 21ª, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
Nelson Fernandez Barrero  
Director Laboratorio TP 4482 CPIQ



### INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Sebastian Pineda
Dirección:	Universidad De America
NIT:	
Contacto:	Sebastian Pineda
Teléfono:	3214704825
E: mail:	<a href="mailto:sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co">sebastian.pineda@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	<b>4508</b>
Matriz:	suelo
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	23/05/2021
Fecha y Hora de Recep:	26/05/2021 11:30
Lugar de Muestreo:	<b>Pacto de Suelo seco</b>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	31/05/2021

Resultado Analítico			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
Hidrocarburos totales	SM 5520 F	%	0,22

S.M. :Standard Methods 2005 21<sup>a</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
 El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
 SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
 Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
 Nelson Fernandez Barrero  
 Director Laboratorio TP 4482 CPIO



**ANEXO 7. CANTIDADES REQUERIDAS PARA PRESUPUESTO DEL ESCENARIO  
PLANTEADO**

PROYECTO: FITORREMEDIACIÓN								
Lote de 100 m x 20 m y depósito de 5x5m								
CANTIDADES DE OBRA								
Ítem	Localización	Und	Cantida d	Largo	Ancho	Alto	PZ	Acumulad o
<b>1.1</b>	<b>localizacion y replanreo</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Area a Tratar 1	m2	1.00	100.00	20.00		2,000	2,000
	Area a Tratar 2	m2	1.00	5.00	5.00		25	2,025
						<b>Subtotal</b>		<b>2,025</b>
								-
<b>1.2</b>	<b>Descapote y limpieza de terreno</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Area a Tratar 1	m2	1.00	100.00	20.00		2,000	2,000
	Area a Tratar 2	m2	1.00	5.00	5.00		25	2,025
						<b>Subtotal</b>		<b>2,025</b>
								-
<b>1.3</b>	<b>despedragado</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Área a Tratar 1	m2	1.00	100.00	20.00		2,000	2,000
	Área a Tratar 2	m2	1.00	5.00	5.00		25	2,025
						<b>Subtotal</b>		<b>2,025</b>
								-
<b>1.4</b>	<b>Retiro de material sobrante</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	zona1	m3	1.00	100.00	20.00	0.30	600	600
	zona 2	m3	1.00	5.00	5.00	0.30	8	608
						<b>Subtotal</b>		<b>608</b>
								-

**Continuación Anexo 7**

<b>1.5</b>	<b>Relleno de nivelación con tierra</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	zona1	m3	1.0	100.0	20.0	0.50	1,000	1,000
	zona 2	m3	1.0	5.0	5.0	0.50	13	1,013
						<b>Subtotal</b>		<b>1,013</b>
<b>2</b>	<b>Cerramiento provisional con polisombra</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Zona 1	ml	1.0	20.0			20.0	20.0
		ml	2.0	100.0			200.0	220.0
		ml	1.0	15.0			15.0	235.0
	zona 2	ml	3.0	5.0			15.0	250.0
						<b>Subtotal</b>		<b>250</b>
<b>3.1</b>	<b>Siembra pasto</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Área a Tratar 1	m2	1.00	100.00	10.00		1,000	1,000
						<b>Subtotal</b>		<b>1,000</b>
<b>3.2</b>	<b>Siembra Girasol</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Área a Tratar 1	m2	1.00	100.00	10.00		1,000	1,000
						<b>Subtotal</b>		<b>1,000</b>
								-
<b>4</b>	<b>Abonado de fondo</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Área a Tratar 1	m2	1.00	100.00	20.00		2,000	2,000
						<b>Subtotal</b>		<b>2,000</b>
								-
<b>5</b>	<b>Riego</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>

**Continuación Anexo 7**

	Área a Tratar 1	m2	1.00	100.00	20.00		2,000	2,000
						<b>Subtotal</b>		<b>2,000</b>
								-
<b>6</b>	<b>Gestión de Residuos peligrosos</b>	<b>Und</b>	<b>Cant.</b>	<b>Long.</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>	<b>PZ</b>	<b>Acumulad o</b>
	Área a Tratar 1	glob al	1.00				1	1
						<b>Subtotal</b>		<b>1</b>
						<b>Santiago Casas</b>		
						<b>Juan Sebastián Pineda</b>		

## ANEXO 8. CRONOGRAMA ESTIMADO DE ACTIVIDADES

Task Mode	Nombre de tarea	Duration	Start	Finish	Prede
	<b>▲ FITORREMEDIACION</b>	<b>145 days?</b>	<b>Mon 4/01/21</b>	<b>Fri 23/07/21</b>	
	▲ PRELIMINARES	20 days?	Mon 4/01/21	Fri 29/01/21	
	Compra de materiales (semillas, fertilizantes, sustratos y demás)	10 days	Mon 8/02/21	Fri 19/02/21	
	Caracterización teórica	10 days?	Mon 22/02/21	Fri 5/03/21	3
	Obtención del suelo de estudio (Puerto Boyacá)	5 days?	Mon 8/03/21	Fri 12/03/21	3
	▲ EXPLORACION	76 days?	Mon 1/03/21	Mon 14/06/21	
	Elaboración del diseño experimental	15 days?	Mon 1/03/21	Fri 19/03/21	
	Acondicionamiento del suelo (quitar impurezas)	10 days?	Tue 16/03/21	Mon 29/03/21	
	Siembra	5 days?	Fri 19/03/21	Thu 25/03/21	8SS+3
	Contaminación con petróleo	10 days?	Fri 19/03/21	Thu 1/04/21	8SS+3
	Primera Aplicación de sustratos y fertilizantes	10 days?	Fri 19/03/21	Thu 1/04/21	8SS+3
	Segunda Aplicación de sustratos y fertilizantes	5 days	Fri 30/04/21	Thu 6/05/21	11FF+
	Tercera Aplicación de sustratos y fertilizantes	5 days	Fri 4/06/21	Thu 10/06/21	12FF+
	Riego	76 days	Mon 1/03/21	Mon 14/06/21	7SS
	▲ EXPERIMENTACION	84 days?	Mon 8/02/21	Thu 3/06/21	
	Analisis de del crudo	15 days?	Mon 8/02/21	Fri 26/02/21	
	▲ PRIMERA PRUEBA	5 days?	Wed 17/03/21	Tue 23/03/21	
	TPH	5 days?	Mon 22/03/21	Fri 26/03/21	
	pH	5 days	Mon 22/03/21	Fri 26/03/21	18SS
	% Humedad	5 days	Mon 22/03/21	Fri 26/03/21	18SS
	Carbono Orgánico	5 days	Mon 22/03/21	Fri 26/03/21	18SS
	▲ SEGUNDA PRUEBA	5 days?	Fri 28/05/21	Thu 3/06/21	
	TPH	5 days?	Mon 29/03/21	Fri 2/04/21	
	▲ EVALUACION	88 days?	Mon 15/02/21	Wed 16/06/21	
	CARÁCTERIZACION DEL SUELO	15 days?	Mon 15/02/21	Fri 5/03/21	
	CARACTERIZACION PLANTAS Y MATERIA PRIMA	15 days	Mon 8/03/21	Fri 26/03/21	25
	▲ DETERMINACION DE LA ESPECIE MAS EFICAZ	58 days	Mon 29/03/21	Wed 16/06/21	
	Primera evaluación	5 days	Mon 29/03/21	Fri 2/04/21	21
	Segunda evaluación	5 days	Thu 10/06/21	Wed 16/06/21	
	ANALISIS DE COSTOS	2 days	Wed 13/01/21	Thu 14/01/21	
	▲ PRESENTACION FINAL	0 days?	Fri 25/06/21	Fri 25/06/21	

