



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 04 de Abril de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

CAROL DENISSE BERMEO CRUZ, con C.C. No. 1075282257,

LAURA MARÍA PÉREZ HUEJE, con C.C. No. 1075281963,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado _____

titulado VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) EN SUELOS CONTAMINADOS MEDIANTE EL USO DE ABONO 100% ORGÁNICO.

presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de

INGENIERO DE PETRÓLEOS _____;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

LAURA MARIA PEREZ H.

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:

Variación porcentual de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en suelos contaminados mediante el uso de abono 100% orgánico.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bermeo Cruz	Carol Denisse
Pérez Hueje	Laura María

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Vargas Castellanos	Constanza

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO DE PETRÓLEOS

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería de Petróleos

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2017

NÚMERO DE PÁGINAS: 146

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas_X_ Fotografías_X_ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_X_ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas_X_ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros_X_

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: NINGUNO

MATERIAL ANEXO:

ANEXO A: Caso Real

ANEXO B: Ficha Técnica Abono 100% Empresa CEAGRODEX

ANEXO C: Geología de la plancha 323 Neiva

ANEXO D: Método realización pruebas estipuladas en la metodología

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): NO

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>HIDROCARBUROS</u>	<u>HIDROCARBONS</u>	6. <u>MICROORGANISMOS</u>	<u>MICROORGANISMS</u>
2. <u>BIORREMEDIACIÓN</u>	<u>BIORREMEDIATION</u>	7. <u>BACTERIAS</u>	<u>BACTERIA</u>
3. <u>COMPOSTAJE</u>	<u>COMPOSTING</u>	8. <u>SUELOS CONTAMINADOS</u>	<u>CONTAMINATED</u>
<u>SOILS</u>			
4. <u>MATERIA ORGÁNICA</u>	<u>ORGANIC MATERIAL</u>	9. <u>ESTIERCOL ANIMAL</u>	<u>ANIMAL MANURE</u>
5. <u>REMEDIACIÓN</u>	<u>REMEDIATION</u>	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Día a día durante la práctica de cada una de las etapas que conforman la industria petrolera tales como perforación, producción, transporte y refinación se generan diversos episodios de contaminación comprometiendo así la integridad del ambiente en el que sucede ya sea en suelo o en agua.

Como seres humanos y futuras ingenieras, nuestro compromiso con el medio ambiente es velar por su bienestar y estabilidad, por lo que la recopilación y estudio que está expuesto en este trabajo investigativo está orientado en el análisis del efecto que genera el abono de la empresa CEAGRODEX en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, el cual se desarrolló mediante un diseño experimental basado en 12 muestras donde el factor común es el mismo tipo de suelo pero presentan como variante



la carga contaminante, la concentración de abono y el tiempo de interacción entre sí para lo cual se escogió realizar las respectivas pruebas de medición del porcentaje de TPH a los días 5, 18 y 25 después de aplicar el tratamiento.

Posteriormente realizar las tres series de pruebas previamente establecidas, se procedió a calcular los TPH (%) obtenidos de cada muestra teniendo como resultado que el abono presenta un comportamiento favorable a la hora de disminuir la carga contaminante, es decir, que se puede usar como un agente bioremediador y además que su eficacia es mucho más notoria cuando la relación que presenta con respecto a la cantidad de suelo a analizar es el doble (relación suelo-abono 1-2).

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Every day, during the practice of every stages that make up the oil industry such as drilling, production, transportation and refining, several episodes of pollution are generated, compromising the integrity of the environment in where it happens, whether in soil or in water.

As human beings and future engineers, our compromise with the environment is to secure their wellbeing and stability, so the investigation and study that is exposed in this research work is oriented in the analysis of the effect that generates the 100% organic fertilizer of CEAGRODEX's enterprise in the bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons, which was developed through an experimental design based on 12 samples that have as common factor the same type of soil but present as variant the initial percentage hydrocarbons pollutant, the concentration of fertilizer and the interacion's time between them. For that reason, it was chosen to realize the respective tests of measurement of the percentage of TPH at days 5, 18 and 25 after applying the treatment.

Subsequently execute the three series of tests previously established, we proceeded to calculate the TPH (%) obtained from each sample, with the result that the fertilizer presents a favorable behavior reducing the hidrocarbons pollutant, this means, that can be used as a biorremediator agent and also that its efficiency is much more noticeable when the relation that presents respect to the quantity of soil to analyze is the double (relationship soil-fertilizer 1-2).



APROBACION DE LA TESIS

Nombre Director: Constanza Vargas Castellanos

Firma: 

Nombre Jurado: JAIME ROJAS PUENTES

Firma: 

Nombre Jurado: LUZ MARINA BOTERO

Firma: 

**VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE
PETRÓLEO (TPH) MEDIANTE EL USO DE ABONO 100% ORGÁNICO**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2017**

**VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE
PETRÓLEO (TPH) MEDIANTE EL USO DE ABONO 100% ORGÁNICO**

**CAROL DENISSE BERMEO CRUZ
LAURA MARIA PEREZ HUEJE**

Trabajo de grado presentado como requisito académico para optar al título de
Ingenieras de Petróleos

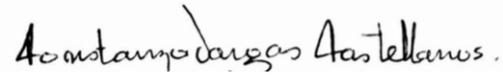
Director.
Ms. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS
Ingeniera de Petróleos

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA
2017**

**VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS HIDROCARBUROS TOTALES DE
PETRÓLEO (TPH) MEDIANTE EL USO DE ABONO 100% ORGÁNICO**

ÁREA DE INVESTIGACIÓN:

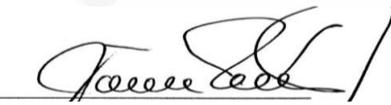
**PRESENTADO AL COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO DEL PROGRAMA DE
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

Director: 

Msc. Constanza Vargas Castellanos

Jurado: 

Msc. Luz Marina Botero Rojas

Jurado: 

Esp. Jaime Rojas Puentes

NEIVA, MARZO DE 2017

AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento principalmente es con Dios a quien le debo todo lo que soy, por cada uno de mis logros, metas, sueños y anhelos cumplidos. A mi papá Ramón Bermeo por su eterno apoyo, por enseñarme que las cosas que más sacrificio requieren son las que más felicidad te dan, por inculcarme siempre el ser responsable y la auto exigencia. A mi mamá Maryi Nury Cruz por ser mi todo, mi ejemplo de mujer a seguir, por ser siempre mi polo a tierra, mi mejor amiga, mi consejera, la cual siempre me llenó de fuerza y amor cada vez que lo necesité, a mi tía Ines Elvira Bermeo por siempre estar presente en cada una de las etapas de mi vida, por su amor, sabiduría y apoyo. A mi directora de tesis Constanza Vargas Castellanos por creer en nosotras, por cada aprendizaje y enseñanza, por ser más que una directora una amiga y consejera, al ingeniero Enrique Sánchez por su apoyo incondicional, a mi amiga y compañera de proyecto Laurita, por la gran dupla que hicimos durante toda la carrera, por su compromiso y entrega, a la cual le deseo de corazón las mejores cosas del mundo a nivel personal y profesional. A mi mejor amiga Pilar Rivera, a la cual agradezco 14 años de amistad incondicional. Agradecimientos mi familia, amigos y a cada una de las personas que dejaron alguna huella y enseñanza en mi vida.

Carol Denisse Bermeo Cruz

Agradezco a Dios por todas las bendiciones recibidas a lo largo de mi vida, a mis padres Fabio Péres y María Fernanda Hueje, a mi hermanita Luz Mary y mi abuelito Ambrosio, ya que ellos son el motor de mi vida y día a día me brindan su amor, su apoyo incondicional y sabiduría, que con sus consejos y cariño me han acompañado en cada una de las etapas que he atravesado y con sus enseñanzas me han hecho la persona que soy. A mi directora de tesis Constanza Vargas y su esposo Enrique Sánchez que fueron parte fundamental en el desarrollo de este proyecto, nos acompañaron, guiaron y enseñaron infinitas cosas que nos hicieron crecer como personas y futuras profesionales, a Juan Nicolás por su amor, comprensión y entrega, por ayudarme de tantas maneras diferentes, animarme y estar siempre para mí. A mi compañera de tesis Carito, por ser una gran amiga, aliada, una excelente persona que me enseñó muchísimo y fue el complemento ideal durante esta etapa. A Dani Godoy por ser la mejor amiga que pueda existir, por estos años de amistad incondicional y por todas las cosas lindas que ha hecho por mí, finalmente a mis amigos, mi código 20111+ que se convirtieron en una familia, compañeros de aventuras, con los que viví momentos increíbles e hicieron de estos años una experiencia inolvidable.

Laura María Pérez Hueje

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACION DE LA VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) EN SUELOS SUPERFICIALES CONTAMINADOS CON CRUDO MEDIANTE EL USO DE ABONO 100% ORGÁNICO DE LA EMPRESA CEAGRODEX EN ZONA INFLUENCIADA POR ACTIVIDAD PETROLERA

AUTORES: Carol Denisse Bermeo Cruz / Laura María Pérez Hueje.

PALABRAS CLAVES: Biorremediación, Contaminación de suelos, Compostaje, Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).

DESCRIPCIÓN:

Día a día durante la práctica de cada una de las etapas que conforman la industria petrolera tales como perforación, producción, transporte y refinación se generan diversos episodios de contaminación comprometiendo así la integridad del ambiente en el que sucede ya sea en suelo o en agua.

Como seres humanos y futuras ingenieras, nuestro compromiso con el medio ambiente es velar por su bienestar y estabilidad, por lo que la recopilación y estudio que está expuesto en este trabajo investigativo está orientado en el análisis del efecto que genera el abono de la empresa CEAGRODEX en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, el cual se desarrolló mediante un diseño experimental basado en 12 muestras donde el factor común es el mismo tipo de suelo pero presentan como variante la carga contaminante, la concentración de abono y el tiempo de interacción entre sí para lo cual se escogió realizar las respectivas pruebas de medición del porcentaje de TPH a los días 5, 18 y 25 después de aplicar el tratamiento.

Posteriormente realizar las tres series de pruebas previamente establecidas, se procedió a calcular los TPH (%) obtenidos de cada muestra teniendo como resultado que el abono presenta un comportamiento favorable a la hora de disminuir la carga contaminante, es decir, que se puede usar como un agente bioremediador y además que su eficacia es mucho más notoria cuando la relación que presenta con respecto a la cantidad de suelo a analizar es el doble (relación suelo-abono 1-2).

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE PERCENTAGE VARIATION OF TOTAL PETROLEUM HIDROCARBONS (TPH) IN SURFACE CONTAMINATED WITH OIL, USING 100% ORGANIC FERTILIZER OF CEAGRODEX'S ENTERPRISE IN AREA INFLUENCED BY PETROLEUM ACTIVITY.

AUTHORS: Carol Denisse Bermeo Cruz / Laura María Pérez Hueje.

KEY WORDS: Bioremediation, Oil-Contaminated Soils, Composting, Total Petroleum Hydrocarbons (TPH).

DESCRIPTION:

Every day, during the practice of every stages that make up the oil industry such as drilling, production, transportation and refining, several episodes of pollution are generated, compromising the integrity of the environment in where it happens, whether in soil or in water.

As human beings and future engineers, our compromise with the environment is to secure their wellbeing and stability, so the investigation and study that is exposed in this research work is oriented in the analysis of the effect that generates the 100% organic fertilizer of CEAGRODEX's enterprise in the bioremediation of soils contaminated with hydrocarbons, which was developed through an experimental design based on 12 samples that have as common factor the same type of soil but present as variant the initial percentage hydrocarbons pollutant, the concentration of fertilizer and the interacion's time between them. For that reason, it was chosen to realize the respective tests of measurement of the percentage of TPH at days 5, 18 and 25 after applying the treatment.

Subsequently execute the three series of tests previously established, we proceeded to calculate the TPH (%) obtained from each sample, with the result that the fertilizer presents a favorable behavior reducing the hydrocarbons pollutant, this means, that can be used as a biorremediator agent and also that its efficiency is much more noticeable when the relation that presents respect to the quantity of soil to analyze is the double (relationship soil-fertilizer 1-2).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿El abono orgánico tendrá la suficiente capacidad microbiana para disminuir los hidrocarburos totales de petróleos presentes en suelos contaminados?

En la actualidad, las operaciones de exploración, producción, refinación y transporte para la obtención de los hidrocarburos en sus actividades cotidianas generan de forma no intencionada diferentes residuos tóxicos y nocivos al medio ambiente que con el paso del tiempo son causantes del deterioro del ecosistema en que éstas son desarrolladas; de igual forma se generan derrames, estos son accidentes que se generan por diversas circunstancias, cuya ocurrencia difícilmente puede ser anticipada, y son de gran impacto ambiental, puesto que modifican las propiedades del suelo y sus características específicas alterando así su actividad vegetal, estabilidad y calidad del medio ambiente, principalmente en suelos y fuentes hídricas.

El uso de nuevas tecnologías para mitigar estos derrames se ha convertido en una necesidad para el desarrollo de las actividades de la industria, por esta razón se han aplicado métodos tanto químicos como físicos que buscan disminuir la contaminación presente en los diferentes escenarios, donde se emplean una gran variedad de elementos para efectuar la eliminación de los contaminantes; estos métodos suelen ser sumamente complicados y altamente costosos, usualmente presentan complicaciones a la hora de su desarrollo y muchas veces no llevan a cabo su función, es decir no logran remediar de manera efectiva los daños.

Se ha buscado darle solución a los problemas generados por el uso de los diferentes métodos de remoción de residuos mencionados anteriormente, por esto surgió la necesidad de incursionar en una nueva metodología a partir de recursos netamente biológicos y acordes al medio ambiente, utilizando diferentes elementos tales como bacterias, algas, microorganismos, materia vegetal, y otros elementos presentes en el entorno como el CO_2 , N_2 , H_2 , y algunos compuestos vitales como el aire y el agua; estos métodos además de ser amigables con el ambiente, son accesibles, económicos y prácticos, puesto que su metodología consiste en emplear diferentes microorganismos capaces de acelerar el proceso natural de degradación de los hidrocarburos impregnados en los suelos, en este proceso las bacterias intentan desdoblarse las cadenas de los hidrocarburos convirtiendo sus componentes en elementos más sencillos que pueden interactuar con el medio ambiente sin implicar daños significativos.

Se han investigado diferentes métodos en los cuales se hayan empleado técnicas biológicas para remediación, en donde se ha estudiado los diferentes parámetros empleados para cultivar estas bacterias y llevarlas a interacción con las zonas contaminadas, en los cuales se tomó en cuenta distintos factores tales como el tiempo que duró realizar la investigación, la materia prima, entre otros.

Con el presente trabajo se quiere emplear abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX como agente remediador, ya que es un material fácil de adquirir, económico y su manipulación representa un peligro mínimo para la salud; los componentes de este material van desde órganos y desechos provenientes de animales como bovinos y porcinos, ripios generados de la tala y poda de árboles y demás material vegetal, hasta desechos generados en el diario vivir de la comunidad son llevados a un proceso de compostaje en el cual se obtiene un abono de tipo orgánico rico en bacterias, microorganismos y nutrientes que se espera, haciéndolos entrar en contacto con los suelos previamente contaminados, aceleren los procesos de degradación natural, y generen el desdoble de los componentes de los hidrocarburos de manera exitosa y eficaz.

INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas inherentes a la industria petrolera a través de la historia ha sido la contaminación que esta genera en todas las etapas operacionales para la obtención del hidrocarburo, en ocasiones por malas prácticas o simplemente por mal manejo de desechos.

Teniendo en cuenta que los hidrocarburos obtenidos del subsuelo son sustancias oleoginosas compuestas por hidratos de carbono, agua, sales, sedimentos, metales y otros, que al momento de entrar en contacto con cualquier tipo de suelo, genera una cadena de contaminación que afecta dichas superficies a nivel biológico, principalmente en la pérdida de nutrientes, la alteración de las especies vegetales y su actividad agrícola.

Por lo anterior, ha surgido la necesidad de investigar y desarrollar diferentes técnicas capaces de mitigar estos efectos adversos, como implementar sistemas y elementos biológicos que busquen acelerar la degradación de los residuos de forma natural, ya que son compatibles al medio ambiente, donde se emplean bacterias, plantas y hongos como agentes biodegradadores, generando así un proceso de biorremediación.

El abono orgánico marca CEAGRODEX, está compuesto por diversos materiales orgánicos ricos en nutrientes y es capaz de mejorar la calidad del suelo, ya que es elaborado con restos animales y vegetales que provienen de la actividad del sacrificio animal que desempeña esta empresa; en el cual se encuentra una carga bacteriana elevada, que podrá ser empleada para la inoculación en suelos contaminados, esperando generar un proceso de degradación bacteriana donde los compuestos de los hidrocarburos sean convertidos a sustancias más simples como el dióxido de carbono, agua y masa microbiana, compatibles con el ambiente natural.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la disminución de TPH (hidrocarburos totales del petróleo) en suelos contaminados con hidrocarburos en zona con influencia de actividad petrolera empleando como agente remediador un abono 100% orgánico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar si el abono de la empresa CEAGRODEX, es apto para procesos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
- Determinar cuál es la concentración necesaria de abono que se debe emplear para ver resultados de remediación dependiendo de la cantidad de crudo que este contaminado la muestra de suelo a analizar.
- Determinar el tiempo que lleva el tratamiento con el abono orgánico para disminuir los niveles de TPH en las muestras de suelo contaminado con hidrocarburo.

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	20
1.1 LA INDUSTRIA PETROLERA Y SU IMPORTANCIA EN LA SOCIEDAD	20
1.2 IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO	21
1.3 ANTECEDENTES.....	22
2. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 HIDROCARBUROS	24
2.1.1 Química de los hidrocarburos.	25
2.2 HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH).....	28
2.3 SUELOS	29
2.3.1 Composición	30
2.3.2 Clasificación de los suelos.	30
2.4 BIORREMEDIACIÓN.....	33
2.4.1 Biorremediación en suelos.	35
2.4.2 Técnicas de biorremediación en suelos.	35
2.4.3 Técnica de Compostaje.....	37
2.4.4 Biorremediación de hidrocarburos en suelos.	41
2.4.5 Biorremediación a fin de disminuir niveles de TPH en suelos.....	42
2.5 ABONO ORGÁNICO CEAGRODEX.....	43
2.5.1 Proceso	43
2.5.2 Composición	44
2.5.3 Características Fisicoquímicas.....	44
2.5.4 Análisis Microbiológico	45
2.5.5 Beneficios.....	45
2.5.6 Influencia del abono en biorremediación de hidrocarburos.	46
2.6 DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS	47
2.6.1 Degradación del petróleo.	47
2.7 IMPLICACIÓN AMBIENTAL DE LOS DERRAMES EN SUELOS	50
2.8 LEGISLACIÓN AMBIENTAL.....	51
2.8.1 Legislación ambiental en Colombia.....	52

3. ÁREA DE ESTUDIO.....	53
3.1 LOCALIZACIÓN	53
3.2 PLANCHA 323-NEIVA.....	57
3.2.1 Estratigrafía de la zona de estudio.....	59
4. MARCO EXPERIMENTAL	61
4.1 ETAPA 1. TOMA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO	62
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO.....	63
4.3 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO LIMPIO Y REMEDIADO.....	63
4.3.1 Propiedades Físicas.....	63
4.3.2 Propiedades Químicas	67
4.4 ETAPA 3. PRUEBA PILOTO PARA ELECCIÓN DE MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE TPH.....	69
4.4.1 Método extracción Soxhlet.....	69
4.3.2 Método Gravimétrico Modificado (Extracción con solvente).....	75
4.5 ETAPA 4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	80
5. BIORREMEDIACIÓN DEL SUELO	86
5.1 BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO	88
6. RESULTADOS	90
6.1 CARACTERIZACIÓN DEL HIDROCARBURO	90
6.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO	91
6.3 CÁLCULOS DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) EN CADA SERIE DE EXPERIENCIAS.....	92
6.3.1 Serie 1.....	92
6.3.2 Serie 2.....	93
6.3.3 Serie 3.....	94
6.4 ESTUDIO ADICIONAL.....	95
7. ANALISIS DE RESULTADOS	98
7.1 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.....	98
7.2 NUTRIENTES.....	110
8. CONCLUSIONES.....	111
9. RECOMENDACIONES	113
10. BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXO A.....	118

ANEXO B.....	131
ANEXO C.....	134
ANEXO D.....	138

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Principales hidrocarburos presentes en el petróleo	24
Ilustración 2. Estructuras químicas de diferentes componentes de hidrocarburos	26
Ilustración 3. Esquema de la composición del suelo.....	29
Ilustración 4. Triángulo textural de suelos.....	31
Ilustración 5. Proceso de biorremediación de suelos.....	35
Ilustración 6. Técnica de Compostaje.....	37
Ilustración 7. Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas.	39
Ilustración 8. Representación esquemática de un sistema de biopilas estáticas. ...	39
Ilustración 9. Proceso de degradación de n-alcanos.	49
Ilustración 10. Degradación de Hidrocarburos aromáticos en presencia de oxígeno.	50
Ilustración 11. Mapa ubicación de toma de muestras.....	54
Ilustración 122. Localización Plancha 323 - Neiva.....	57
Ilustración 13. Geología Plancha 323 - Neiva.....	58
Ilustración 14. Estratigrafía zona toma de muestras.....	59
Ilustración 15. Diseño experimental.....	61
Ilustración 16. Recolección Toma de muestras.....	62
Ilustración 17. Prueba Método Bouyoucos.....	64
Ilustración 18. Montaje para realizar tamizaje.....	64
Ilustración 19. Carta Munsell.....	65
Ilustración 20. Prueba análisis de humedad.....	66
Ilustración 21. Equipo para medir pH.....	67
Ilustración 22. Equipo para medir Conductividad Electrica (CE).....	68
Ilustración 23. Prueba piloto Soxhlet.....	71
Ilustración 24. Prueba piloto método gravimétrico modificado.....	78
Ilustración 25. Recipiente empleado para el montaje de las eras.....	81
Ilustración 26. Compartimientos para elaboración de eras.....	83
Ilustración 27. Suelo y abono respectivamente.....	84
Ilustración 28. Jeringas empleadas en la contaminación.....	84
Ilustración 29. Eras contaminadas.....	85
Ilustración 30. Desarrollo de pruebas, Momento 1.....	86
Ilustración 31. Desarrollo de pruebas, Momento 2.....	87

Ilustración 32. Desarrollo de pruebas, Momento 3.....	87
Ilustración 33. Desarrollo de pruebas, Momento 4.....	88

Anexo A

Ilustración 34. Toma de muestras en el lugar el derrame (accidente). Caso real.	118
Ilustración 35. Muestras tomadas. Caso real.....	119

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Relación Abono - Hidrocarburos.	95
Gráfica 2. Variación del TPH (%) al entrar en dilución por aplicación del abono a los 0 días.	98
Gráfica 3. Variación de TPH (%) al día 5 del tratamiento.	99
Gráfica 4. Variación de TPH (%) al día 18 del tratamiento.	100
Gráfica 5. Variación de TPH (%) al día 25 del tratamiento.	101
Gráfica 6. Variación del TPH (%) al día 90 del tratamiento.....	102
Gráfica 7. Variación del TPH (%) durante el tratamiento.	103
Gráfica 8. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-1).....	103
Gráfica 9. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-2).....	104
Gráfica 10. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-0.5).....	104
Gráfica 11. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-0.25).....	105
Gráfica 12. Variación del TPH (%) en las muestras con un 3% de contaminación en mezcla antes y durante el uso del tratamiento a base de abono.	105
Gráfica 13. Variación del TPH (%) en las muestras con un 5% de contaminación en mezcla antes y durante el uso del tratamiento a base de abono.	106
Gráfica 14. Variación del TPH (%) en las muestras con un 10% de contaminación en mezcla antes y durante el uso del tratamiento a base de abono.	106
Gráfica 15. % Remoción TPH en muestras con 3% de contaminación Inicial (mz) durante el tratamiento.	107
Gráfica 16. %Remoción TPH en muestras con 5% de contaminación Inicial (mz) durante el tratamiento.	107
Gráfica 17. %Remoción TPH en muestras con 10% de contaminación Inicial (mz) durante el tratamiento.	108
Gráfica 18. % Remoción TPH en muestras durante el tratamiento completo.	108
Gráfica 19. Variación % TPH en muestras con respecto a normas legales acogidas por Colombia.....	109
Gráfica 20. Comparación de la variación de % TPH con respecto a la legislación ambiental acogida por Colombia.....	109

Anexo A

Gráfica 21. Variación del TPH (%) al entrar en dilución por aplicación del abono a los 0 días. Caso real.	123
Gráfica 22. Variación de TPH (%) al día 5 del tratamiento. Caso real.	124
Gráfica 23. Variación de TPH (%) al día 18 del tratamiento. Caso real.	125
Gráfica 24. Variación de TPH (%) al día 25 del tratamiento. Caso real.	126
Gráfica 25. Variación de TPH (%) al día 90 del tratamiento. Caso real.	127
Gráfica 26. Variación del TPH (%) durante el tratamiento para cada muestra. Caso real.	127
Gráfica 27. % Remoción de TPH en muestras durante todo el tratamiento. Caso real.	128
Gráfica 28. Variación % TPH en muestras con respecto a normas legales acogidas por Colombia. Caso real.	128
Gráfica 29. Comparación de la variación % TPH con respecto a la legislación ambiental acogida por Colombia. Caso real.	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de fracciones químicas de hidrocarburos.	25
Tabla 2. Clasificación del suelo según su granulometría	32
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la biorremediación.	33
Tabla 4. Parámetros a considerar y rangos óptimos durante un proceso de composteo para tratamiento de suelos contaminados por compuestos orgánicos.	40
Tabla 5. Ficha técnica general de abono CEAGRODEX	44
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas del abono CEAGRODEX	44
Tabla 7. Microorganismos presentes en abono de CEAGRODEX	45
Tabla 8. Coordenadas puntos toma de muestras.	55
Tabla 9. Clasificación del suelo según su porosidad.	66
Tabla 10. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH.	67
Tabla 11. Clasificación de suelos según su CE, pH y Sodio Intercambiable.	69
Tabla 12. Composición de la contaminación para realizar las pruebas piloto.....	69
Tabla 13. Condiciones iniciales prueba piloto método Soxhlet.	72
Tabla 14. Resultados obtenidos prueba piloto método Soxhlet.	73
Tabla 15. Datos para cálculo de Porcentaje de saturación de aceite	73
Tabla 16. Condiciones iniciales prueba piloto método gravimétrico modificado. ...	78
Tabla 17. Datos obtenidos prueba piloto método gravimétrico modificado.....	79
Tabla 18. Comparación datos obtenidos en prueba piloto método gravimétrico modificado.....	79
Tabla 19. Datos a recolectar durante el desarrollo del diseño experimental.....	80
Tabla 20. Denominación de las eras acuerdo a su carga contaminante y de abono.	81
Tabla 21. Cronograma pruebas.	86
Tabla 22. Composición Era 1.....	89
Tabla 23. Reporte Propiedades Químicas del suelo.....	91
Tabla 24. Reporte Propiedades Físicas del suelo.....	91
Tabla 25. Reporte de valores iniciales de %TPH en dilución con tratamiento de abono.....	92
Tabla 26. Reporte de datos obtenidos en la Serie 1.	93
Tabla 27. Reporte de datos obtenidos en la Serie 2.	94

Tabla 28. Reporte de datos obtenidos en la Serie 3.	94
Tabla 29. Reporte de datos obtenidos en la Serie 4 (90 días).	96
Tabla 30. Reporte de datos obtenidos durante el desarrollo de la investigación. ...	97
Tabla 31. Aporte nutricional por parte del abono al suelo en cantidades iguales.	110
Tabla 32. Aporte nutricional del abono de acuerdo a la relación suelo-abono manejado en el diseño experimental.	110

Anexo A

Tabla 33. % TPH Inicial a t= 0 días de la muestra global tomada. Caso real.	119
Tabla 34. Relación suelo-abono para el tratamiento a aplicar en las muestras. Caso real.	120
Tabla 35. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 5 días. Caso real.	120
Tabla 37. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 25 días. Caso real.	121
Tabla 38. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 90 días. Caso real.	122
Tabla 39. Reporte de datos obtenidos durante todo el tratamiento. Caso real. ...	122

1. GENERALIDADES

1.1 LA INDUSTRIA PETROLERA Y SU IMPORTANCIA EN LA SOCIEDAD

El petróleo es un recurso natural no renovable, es el resultado de la degradación anaeróbica de materia orgánica, durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones de alta temperatura y presión, que la convierte en gas natural, crudo y derivados del petróleo. El petróleo es una mezcla extremadamente compleja y variable de compuestos orgánicos, donde la mayoría de los ellos son hidrocarburos, que varían en peso molecular desde el gas metano hasta los altos pesos moleculares de alquitranes y bitúmenes.

El petróleo y sus derivados, han sido una fuente de energía y materia prima, que el hombre ha aprovechado en su beneficio, para el transporte aéreo, acuático y terrestre, se utiliza en las industrias químicas, farmacéuticas, manufactura de plásticos y materiales diversos, incluyendo sus primeros usos: de impermeabilización, iluminación, como generador de electricidad, este corresponde al energético más importante en la historia de la humanidad, alimenta un porcentaje muy alto del consumo de energía del mundo, entre el 32% de Europa y Asia, hasta el 53% de Oriente Medio, en Sudamérica y América Central el 44%, África el 41% y Norteamérica el 40%¹.

El petróleo contiene tal diversidad de componentes que difícilmente se encuentran dos tipos idénticos. Existen parámetros internacionales, como los del Instituto Americano del Petróleo (API) que diferencian sus calidades y por tanto su valor. Así, entre más grados API tenga un petróleo, mejor es su calidad.

El sector petrolero en Colombia ha tenido una importancia creciente en la economía del país en los últimos años. Este sector es estratégico para la economía por su alta participación en el producto interno bruto, porque genera un porcentaje muy alto de las exportaciones totales y porque es también una fuente muy importante de recursos fiscales para el gobierno nacional y para los gobiernos seccionales².

¹ (Vasallo, J., y Herrera, D., 2002)

² (Vargas, P., et al., 2004)

1.2 IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

En la actividad petrolera, las disposiciones y el manejo habitual de hidrocarburos y combustibles, en algunos casos conlleva a la contaminación del ambiente, cuando tanques, oleoductos y diversas instalaciones sufren daños. Los líquidos migran hacia el suelo, subsuelo (zona vadosa) y hacia el agua subterránea (zona saturada – acuífero) o superficialmente hacia un bajo topográfico o curso de agua, y sus componentes volátiles a la atmósfera. No solo las contaminaciones se producen por roturas de los sistemas de almacenaje o de transporte, sino que el mal manejo del producto puede provocar impactos negativos en la ecología regional³. El petróleo en el suelo, que pasa a considerarse como un contaminante, se convierte en un riesgo para la salud humana y el ecosistema. En algunos casos, la contaminación no solo provoca problemas de toxicidad, sino que además puede ocasionar grandes riesgos de explosiones y/o incendios.

La industria petrolera en su conjunto ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental. Debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo que se manejan y que no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos, ni del seguimiento a la infraestructura petrolera, esta se integra por:

- Pozos de explotación.
- Baterías de separación.
- Complejos procesadores de gas.
- Centrales de almacenamiento y bombeo.
- Redes de ductos y piletas para el confinamiento de desechos sólidos y líquidos procedentes de la perforación y mantenimiento de los pozos.
- Transporte y distribución en general.
- Estaciones de servicio de combustible.

³ (Vasallo, J., Herrera, D., 2002)

1.3 ANTECEDENTES

Para la realización de este proyecto de grado fue necesario realizar una exhaustiva investigación acerca de estudios en el área de biorremediación, y los diferentes procesos y trabajos que se han llevado a cabo para atender derrames ocasionados en las diferentes áreas de trabajo de la industria.

Se evaluaron casos a nivel local, nacional e internacional seleccionando lo más interesantes, novedosos e innovadores y con la mayor tasa de efectividad, a continuación, presentamos algunos de los precedentes mencionados en orden cronológico.

- En el 2008, Ibarra, Diana., presentó un proyecto de grado donde se estudiaron suelos en inmediaciones del campo Payoa, perteneciente a Petrosantander Inc. Empleando un cultivo de microorganismos de cepas nativas previamente inoculadas, para realizar un proceso de bioaumentación microbiana, realizando un pre-tratamiento con un biosurfactante; Posteriormente se llevaron a cabo ensayos mezclando el suelo contaminado y pre-tratado con las cepas bacterianas, combinando las muestras entre sí y junto con diferentes proporciones de suelos limpios.
- En el 2008, Ogbo y Okhuoya emplearon estiércol animal y otros acondicionadores como cáscaras y materia orgánica vegetal para disminuir las fracciones tóxicas en un suelo contaminado con crudo, este estudio fue realizado en Abraka – Nigeria.
- En el 2010, Roldan, F., evaluó, la biodegradación y la lixiviación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) durante la atenuación natural (AN) en los procesos de los lodos aceitosos utilizados en el mantenimiento de caminos no pavimentados, este estudio fue realizado por un camino situado en Arauca (Colombia) y al mismo tiempo en el laboratorio donde las condiciones de lluvia se han simulado mediante el uso de columnas. En el estudio, se evaluaron tres profundidades (5, 50 y 80 cm). La degradación de HTP se evaluó mediante el control de las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas in situ y en las columnas durante 538 y 119 días, respectivamente. Los niveles de pH observados fueron constantes, oscilando entre los valores óptimos para la biodegradación ($6,2 \pm 0,9$).
- En julio de 2012, el departamento de microbiología de la Universidad de Granada-España mide la eficiencia de remoción de TPH presentado en muestras de suelo impregnadas de Diesel empleando abono elaborado a base solo materia orgánica.

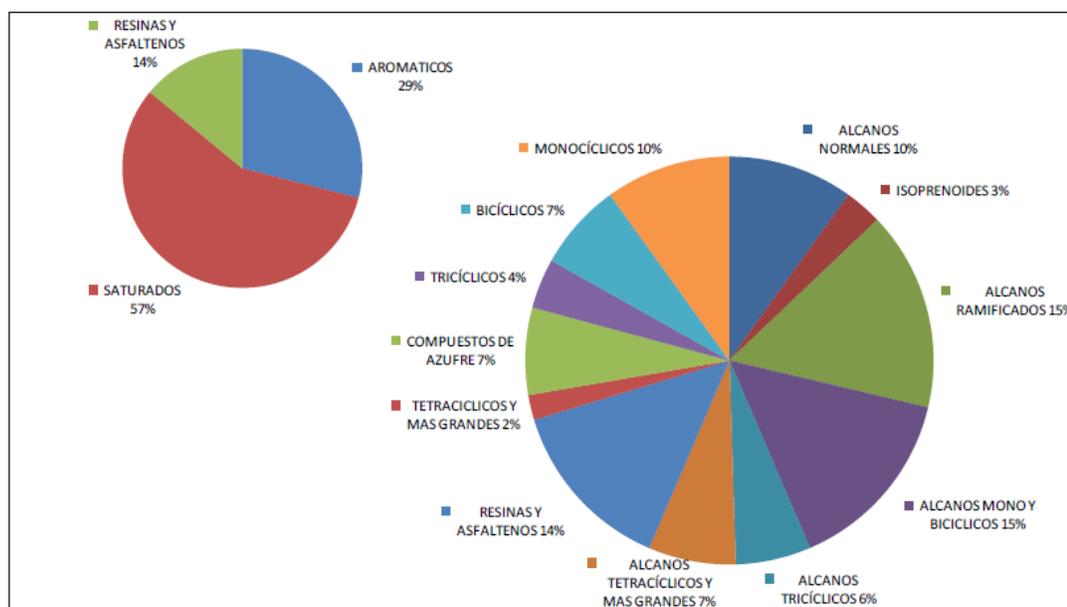
- En 2013, Rfik M. Hesnawi y Farid S. Mogadami presentan su investigación acerca de cómo es la variación de la cantidad de TPH en suelos contaminados con crudo de la República de Libia bajo dos condiciones distintas de temperatura 25°C y 45°C.
- En 2013, Yang Xu, et al. publicó los resultados y análisis de su investigación sobre biorremediación usando agentes microbianos y plantas (fitorremediación), evaluando simultáneamente los impactos de los contaminantes hidrocarburos sobre dichas plantas.
- Entre los años 2013 y 2014, Stoyan Groudev, Plamen Georgiev, Irena Spasova y Marina Nicolova, de la Univerisdad de minas y Geología en Sofía-Bulgaria, agregaron grandes aportes al determinar la disminución del contenido de TPH y la toxicidad de unos suelos contaminados fuertemente.
- A principios de 2014, fue aprobado y publicado en la revista Elsevier en la sección “International Biodeterioration & Biodegradation”, un documento basado en los estudios de campo y observaciones de laboratorio de la biorremediación del TPH en suelos contaminados con hidrocarburos; Trabajo realizado por Fatihah Suja et al. Faculty of Engineering & Built Environment, University Kebangsaan Malaysia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 HIDROCARBUROS

Generalmente, el hidrocarburo se define por ser un líquido negro, viscoso y con una composición química sumamente compleja⁴, pudiendo contener miles de compuestos, básicamente de la familia de los hidrocarburos los cuales son acumulados de forma natural debido a muy específicas condiciones geológicas⁵. El crudo compone la familia preponderante de compuestos (un 50-98% de la composición total), constituyendo uno de los grupos de contaminantes ambientales más importantes, tanto por su abundancia, como por su persistencia en distintos compartimientos ambientales. La composición elemental de un crudo está condicionada por la predominancia de los compuestos tipo hidrocarburo: 83-87% C, 10-14% H, 0.05-6% S, 0.05-1.5% O y 0.1-2% N y metales como el níquel y el vanadio⁶.

Ilustración 1. Principales hidrocarburos presentes en el petróleo



(García, 2005)

⁴ (Atlas, 1981)

⁵ (Fernández-Varela, et al., 2006; Nadiem, et al., 2000)

⁶ (Speight, 2001)

2.1.1 Química de los hidrocarburos.

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados principalmente por carbono e hidrógeno. Debido a que su composición química es sumamente compleja, pudiendo contener miles de compuestos⁷, se ha optado por clasificar los hidrocarburos por las similitudes que presentan en las estructuras de sus moléculas, en diferentes subgrupos⁸. Los principales subgrupos son:

- i. Saturados o parafínicos (*n*-alcanos, alcanos ramificados con cadenas alquílicas y las cicloparafinas).
- ii. Fracción aromática (monoaromáticos, diaromáticos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's),
- iii. Fracción de resinas
- iv. Fracción de asfaltenos que son menos abundantes y consisten en compuestos más polares.

Tabla 1. Composición de fracciones químicas de hidrocarburos.

Fracción o Subdivisión	Composición
Saturados o Parafínicos	<i>n</i> -alcanos, alcanos de cadena ramificados e isoprenoides, y cicloparafinas o cicloalcanos, hopanos.
Aromáticos	Hidrocarburos monoaromáticos, diaromáticos, aromáticos policíclicos (PAH's).
Resinas	Agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos y amidas.
Asfaltenos	Agregados de PAH, ácidos nafténicos, sulfuros, ácidos grasos, metaloporfirinas, fenolespolihidratados.

(Canals, M., 2005)

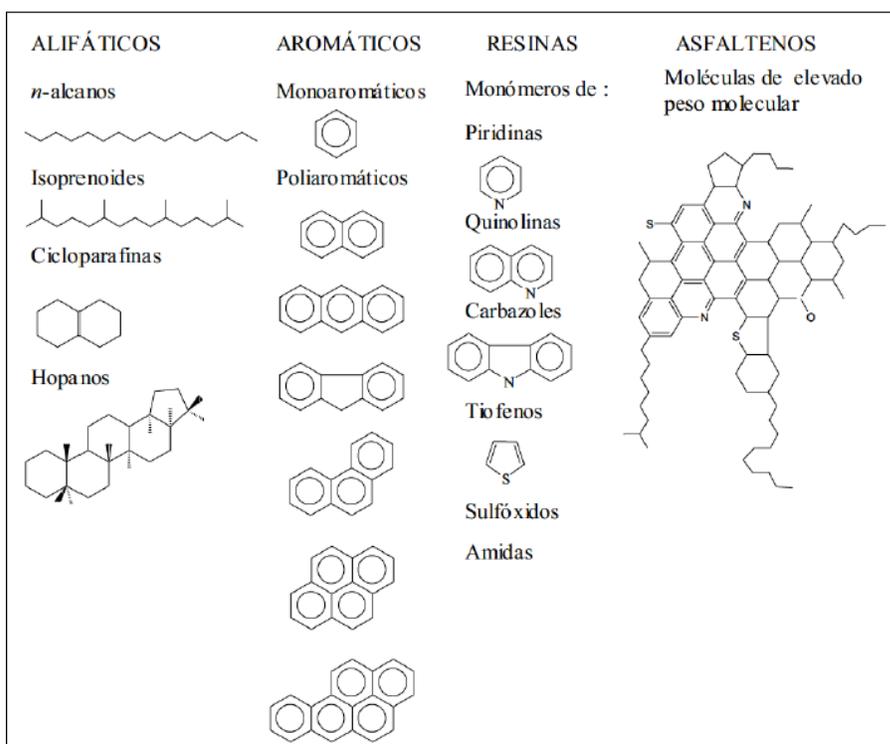
Según Howe-Grant (1996) la composición de los hidrocarburos se ha agrupado de forma más detallada, en las siguientes familias:

⁷ (Rosini, 1960)

⁸ (Kostas, J. L. 1993)

- Parafinas volátiles (alcanos ramificados y no ramificados, hasta C₁₀).
- Parafinas no volátiles (alcanos ramificados y no ramificados, entre C₁₀-C₄₀).
- Naftenos (Cicloalcanos o cicloparafinas).
- Oleofinas (alquenos).
- Aromaticos (monoaromáticos y poliaromáticos).
- Resinas y asfaltenos.

Ilustración 2. Estructuras químicas de diferentes componentes de hidrocarburos



(Benavidez et al, 2006)

2.1.1.1 Hidrocarburos Alifáticos o Saturados.

Los hidrocarburos saturados (también conocidos como alifáticos o parafínicos) se dividen en alcanos acíclicos (normales y ramificados) y cicloalcanos (naftenos)⁹. Mayoritariamente, predominan los alcanos (cadenas lineales), extendiéndose de 1

⁹ (Atlas, 1981)

hasta 40 o más átomos de carbono¹⁰, pero normalmente se alcanza un máximo que varía desde valores próximos a 25 hasta valores próximos a 15 a medida que crece la madurez del petróleo. Entre los alcanos ramificados se suele encontrar los iso-alcanos (2-metilalcanos) y posiblemente cantidades menores de anteiso-alcanos (3-metilalcanos); ambos grupos exhiben un número de átomos de carbono similar a los de los n-alcanos. Los alcanos acíclicos isoprenoides pueden ser constituyentes importantes, en especial el pristano y el fitano que proviene de la clorofila contenida en la materia orgánica inicial.

2.1.1.2 Hidrocarburos Aromáticos.

El crudo de petróleo contiene una mezcla muy compleja de hidrocarburos aromáticos. Esta fracción la componen moléculas que contienen uno o varios anillos bencénicos en su estructura. Así encontramos hidrocarburos monoaromáticos (un anillo bencénico), diaromáticos (2 anillos bencénicos) y poliaromáticos (HAPs, con más de dos anillos bencénicos).

- Hidrocarburos monoaromáticos.
Se encuentra el benceno y sus alquilados (monoalquilados como el tolueno y dialquilados como los xilenos), formando la familia de los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) de gran importancia ambiental debido a su volatilidad y toxicidad.
- Hidrocarburos poliaromáticos.
Entre los hidrocarburos diaromáticos, encontramos el nafteno y sus alquilados (mono, di, tri y tetrametilnaftenos). Constituyen la familia mayoritaria de hidrocarburos aromáticos presente en un crudo. Entre los hidrocarburos poliaromáticos de tres anillos encontramos el fenantreno, antraceno, fluoreno, y sus derivados alquilados.

2.1.1.3 Resinas.

Las resinas son compuestos con valores de polaridad y pesos moleculares más altos que los saturados y aromáticos. Están compuestos de grupos polares finales (presencia de heteroátomos de oxígeno, nitrógenos y azufre) y de grupos parafínicos no polares¹¹. Las moléculas de las resinas son estructuralmente similares a la de los asfaltenos, pero tienen menor peso molecular, mayor ratio hidrógeno/carbón y menor contenido de heteroátomos¹².

¹⁰ (Talat, et al., 1998)

¹¹ (Boukir, et al., 2001)

¹² (Gafonova, et al., 2001)

2.1.1.4 Asfaltenos.

En términos generales, los asfaltenos son considerados compuestos orgánicos que pueden o no estar asociados con el petróleo. J. Boussingault, originalmente definió el término “asfalteno” en 1837, como el residuo de la destilación del crudo¹³. Los asfaltenos puros no son volátiles, no ebulen, se descomponen cuando se calientan, son sólidos secos negros y no son solubles en petróleo, aunque se encuentran suspendidos en forma de coloides.

Los asfaltenos pueden ser descritos según dos puntos de vista: operacional y molecular. En relación a la solubilidad (operacional) los asfaltenos se definen como macromoléculas solubles en tolueno e insoluble en n-heptano o n-pentano. En relación a su estructura química todavía no hay una acertada conformación de los asfaltenos, sin embargo, el común de las apreciaciones coincide en que se pueden representar como el grupo con mayor peso molecular de los hidrocarburos de petróleo.

2.2 HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH)

El término hidrocarburos de petróleo, se usa para describir a un grupo extenso de varios cientos de sustancias químicas derivadas originalmente del petróleo crudo. En este sentido, los hidrocarburos de petróleo son realmente una mezcla compleja, denominados así porque casi todos los componentes están formados de carbono e hidrógeno¹⁴.

El gran número de hidrocarburos moleculares presentes en el petróleo dificulta mucho las tareas de separación e identificación de sus componentes. El análisis más extenso llevado a cabo hasta la fecha alcanza el aislamiento y la identificación de aproximadamente 175 hidrocarburos¹⁵. Estos compuestos aislados representan solamente alrededor de 50% y son principalmente hidrocarburos de puntos de ebullición bajos. De los 175 hidrocarburos aislados, 108 son compuestos alifáticos saturados, mientras que 57 son aromáticos.

¹³ (Pineda-Flores, et al., 2001)

¹⁴ (ASTDR, 1999)

¹⁵ (Hamel, 2009)

Debido a que hay muchos productos químicos diferentes en el petróleo crudo y en otros productos de petróleo, no es práctico medir cada uno en forma separada. Sin embargo, es útil medir la cantidad total de TPH en un sitio¹⁶. Los científicos han dividido a los TPH en grupos de hidrocarburos de petróleo que se comportan en forma similar en el suelo o el agua. Estos grupos se llaman fracciones de hidrocarburos de petróleo. Cada fracción contiene muchos productos químicos individuales. Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los TPH incluyen a hexano, combustibles de aviones de reacción, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina, y fluoreno, como también otros productos de petróleo y componentes de gasolina. Sin embargo, es probable que muestras de TPH contengan solamente algunas, o una mezcla de estas sustancias químicas.

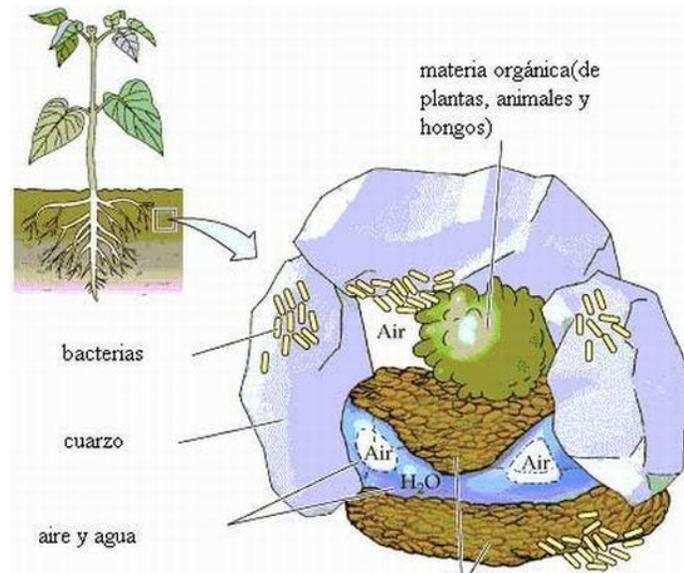
Los TPH pueden entrar al ambiente a raíz de accidentes, fugas y derrames industriales, o como subproductos de uso comercial o privado. Una vez en el ambiente una fracción de los TPH flotará en el agua y formará una capa superficial. En tanto, la otra fracción de los TPH se depositará en los sedimentos del fondo. La presencia de TPH en el ambiente puede ser de origen natural o antrópica, la problemática de contaminación por TPH surge cuando las cantidades de hidrocarburos en los suelos, aguas superficiales y/o subterráneas son mayores a la capacidad de degradación de los microorganismos presentes en el medio, responsables de oxidar y mineralizar los TPH a sustancias inocuas. Las fracciones de TPH que no sean degradadas se adherirán a las partículas en el suelo o sedimentos donde pueden permanecer por largo tiempo dando origen a un suelo contaminado por hidrocarburos, en el cual se encuentran presentes hidrocarburos que por sus cantidades y características afecten la naturaleza del suelo.

2.3 SUELOS

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación. Es una estructura de vital importancia para el desarrollo de la vida. El suelo sirve de soporte a las plantas y le proporciona los elementos nutritivos necesarios para subdesarrollo.

Ilustración 3. Esquema de la composición del suelo

¹⁶ (ASTDR, 1998)



(Chiou, 2002)

Su formación se debe a la descomposición de rocas por cambios bruscos de temperatura y la acción de la humedad, aire y seres vivos. El proceso mediante el cual los fragmentos de roca se hacen cada vez más pequeños, se disuelven o van a formar nuevos compuestos, se conoce como meteorización. El suelo constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que confiere la capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso antropogénico.

2.3.1 Composición

La matriz de un suelo está conformada por cinco (5) componentes principales, los cuales son:

- **Minerales:** Constituyen el principal componente presente en los suelos y suponen más del 50% del volumen total.
- **Aire – agua:** En unión conforman el volumen poroso presente, ocupa entre el 25 y 50% del volumen total del suelo. La proporción aire – agua varía considerablemente de acuerdo a la humedad que presente el suelo.
- **Materia orgánica:** Constituyen en el volumen total entre un 3 y 6%.
- **Organismos vivos:** Representan menos del 1% del volumen total.

2.3.2 Clasificación de los suelos.

Las partículas del suelo se agrupan en diversas fracciones atendiendo a su tamaño, de la siguiente forma:

- Arcilla: Pasa por un tamiz de 0,002 mm (2 μ m).

$$\%Arena = 100 - \left(\frac{Lect\ de\ hidro\ a\ 40\ seg + Factor\ de\ corr.\ de\ Temp}{Peso\ de\ ls\ muestra} \right) * 100$$

- Limo: Queda retenido en el tamiz de 0,002 mm pero pasa a través del tamiz de 0,05 mm.

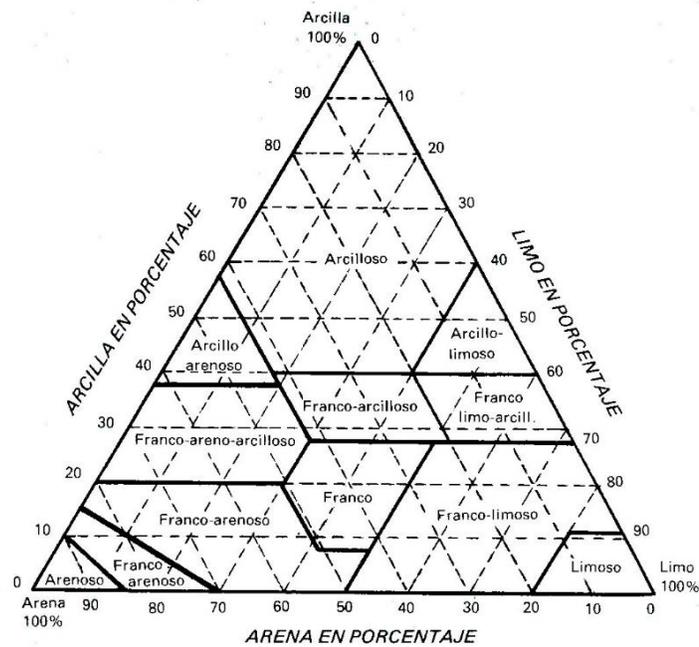
$$\%Limo = \left(\frac{Lect\ de\ hidro\ a\ 2\ horas + Factor\ de\ corre.\ de\ Temp}{Peso\ de\ la\ muestra} \right) * 100$$

- Arena: Queda retenida en el tamiz de 0,05 mm aunque pasa a través del de 2 mm.

$$\%Arcilla = 100\% - \%Arena - \%Limo$$

Entre los múltiples criterios existentes para la clasificación textural del suelo se emplea el del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) basado en el triángulo textural, donde se conoce que tipo de suelo se trata de acuerdo a la cantidad presente de arcilla, arena y limo.

Ilustración 4. Triángulo textural de suelos



(USDA, 1951)

De acuerdo a la granulometría que presente el suelo, la USDA estableció la siguiente clasificación:

Tabla 2. Clasificación del suelo según su granulometría

Tipo de Partícula	Diámetro (mm)
Arena	
Gravilla	1,0 – 2,0
Arena gruesa	0,5 – 1,0
Arena media	0,25 – 0,5
Arena fina	0,1 – 0,25
Arena muy fina	0,05 – 0,1
Limo	0,002 – 0,05
Arcilla	< 0,002

(USDA, 1951)

2.4 BIORREMEDIACIÓN

La Biorremediación es un proceso que utiliza organismos vivos como microorganismos, hongos y plantas, por medio de agentes o compuestos derivados de cualquiera de ellos, para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural ya sea en el suelo o en aguas¹⁷. También se define como el proceso de aceleración de la tasa de degradación natural de hidrocarburos por adición de nutrientes¹⁸.

Las características de los organismos biorremediadores son:

- Casi todos son eubacterias.
- Poseen actividad de peroxidasas y oxigenasas.
- La oxidación cambia las propiedades de los compuestos, haciéndolos susceptibles a los ataques y facilitando su conversión a CO₂ y H₂O.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la biorremediación.

Ventajas	Desventajas
Generalmente solo origina cambios físicos menores sobre el medio.	Para muchos tipos de vertidos su efectividad no ha sido determinada.
Permite la revegetalización natural.	De muy difícil aplicación en el mar.
Puede ser útil para retirar algunos de los compuestos tóxicos del petróleo.	El tiempo necesario para la actuación es largo.
Ofrece una solución más simple y competitiva que las tecnologías físicas o químicas, como la incineración utilizada para remover sustancias tóxicas del suelo.	Su implementación es específica para cada lugar contaminado; requiriendo de diversos factores del sitio como la presencia de microorganismos activos y condiciones de crecimiento adecuadas.
Es menos costosa que otras tecnologías.	El seguimiento y control de la velocidad y/o extensión del proceso son dispendiosos.

¹⁷ Liu et al., 1989.

¹⁸ Ercolli y Gálvez, 2001.

Tabla 3. (Continuación)

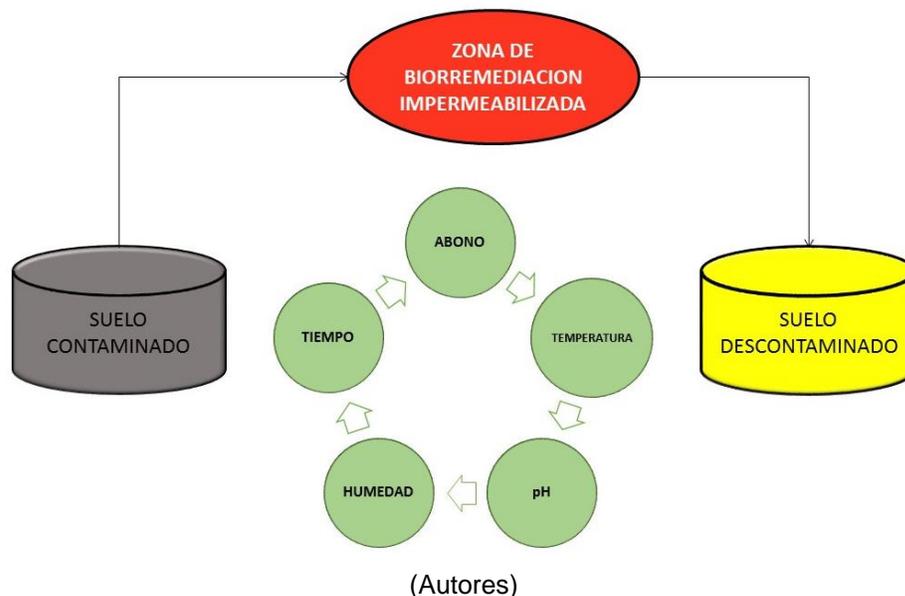
Puede aplicarse <i>in-situ</i> o ex – situ.	Dificultad para predecir el funcionamiento de este tratamiento.
Es más efectiva que otros métodos, pudiendo lograr la detoxificación completa.	El nivel de contaminantes no debe ser tóxico para los microorganismos; en el caso de hidrocarburos debe ser <30%.
Como subproducto se obtiene un suelo útil para la agricultura.	Es aplicable casi solo a compuestos biodegradables.
Apenas se generan residuos y los que se generan en su mayoría no son tóxicos.	Es difícil predecir el tiempo de requerido para un proceso adecuado.
Es un proceso natural, aceptado por la opinión pública y normativas medioambientales.	Es difícil de extrapolar condiciones del laboratorio o planta piloto al sitio final a remediar.
Mientras que los tratamientos físicos y buena parte de los químicos están basados en transferir la contaminación entre medios gaseoso, líquido y sólido, en la biorremediación se transfiere poca contaminación de un medio a otro; lo que ocasiona es su degradación final.	La biodegradación incompleta puede generar intermediarios metabólicos inaceptables, con un poder contaminante similar o incluso superior al producto de partida y algunos compuestos contaminantes son tan resistentes que pueden incluso inhibir la biorremediación.
Cuando se utiliza correctamente no produce efectos adversos significativos.	Requiere investigación multidisciplinaria para determinar y optimizar las condiciones de biorremediación.
No requiere de equipamiento especializado para su aplicación, es poco invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio.	Su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y las características del vertido.

(Orosco Verdezoto & Soria Guano, 2008; Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009; Villaseñor Roa, 2011.)

2.4.1 Biorremediación en suelos.

La Biorremediación en suelos es empleada para atacar o sustraer agentes contaminantes específicos del suelo, se realiza por medio de degradación o transformación de diferentes compuestos nocivos en otros de menor toxicidad o materia orgánica en descomposición. Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza y una adecuada manipulación de los sistemas biológicos puede aumentar la velocidad de cambio¹⁹. La biorremediación es eficiente en el momento de la limpieza de suelos contaminados (si las condiciones de biodegradación son óptimas), en contraste con alternativas más costosas, económica y ambientalmente como la incineración²⁰. Este tipo de remediación se puede acelerar por adición de nutrientes como nitrógeno y fósforo, la modificación de variables operacionales como humedad, pH y oxígeno, y la inoculación demicroorganismos²¹.

Ilustración 5. Proceso de biorremediación de suelos



2.4.2 Técnicas de biorremediación en suelos.

Afortunadamente la biotecnología ha permitido el desarrollo de diversas estrategias que pueden ser utilizadas con el fin de restaurar el suelo y la calidad

¹⁹ Rojas, 1999, Cárdenas et al., 1996; Menezes et. Al., 2003.

²⁰ Álvarez, 2001; Belloso, 1998; Cursi y Calleja, 2000.

²¹ Ercolli y Gálvez, 2001.

ambiental, de acuerdo con las necesidades y dimensiones del problema a solucionar²². La biorremediación puede llevarse a cabo In-Situ (excavando el terreno y tratándolo a pie de excavación) o bien Ex-Situ (en instalaciones aparte). Entre las técnicas implementadas y que han dado resultado hasta el momento se encuentran:

- Bioestimulación: Implica la adición de oxígeno y/o nutrientes en el suelo contaminado con el fin de estimular la actividad de los microorganismos autóctonos y con ello la biodegradación de los contaminantes²³.
- Bioaumentación. Consiste en la adición de microorganismos vivos que tienen la capacidad de degradar el contaminante en cuestión y así promover su biodegradación o biotransformación²⁴.
- Biolabranza. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve (labra) periódicamente para favorecer su aireación. Durante la biolabranza, el suelo contaminado se mezcla con suelo limpio²⁵.
- Bioventeo. Consiste en estimular la biodegradación aerobia de un contaminante por medio del suministro de aire en el sitio contaminado.
- Fitorremediación. Es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos o sedimentos.
- Biorreactores. Es la tecnología más adecuada para casos en que los peligros potenciales de descargas y emisiones sean serios. Permite la combinación controlada y eficiente de procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoran y aceleran la biodegradación.
- Biodegradación en fase sólida. Este tipo de tecnología generalmente se lleva a cabo ex situ, e incluye el composteo, las pilas estáticas y las pilas alargadas que se describe con detalle más adelante.

La técnica considerada apropiada para llevar a cabo este proceso, debe ser el resultado de la valoración de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante por tratar²⁶. La técnica aplicada en este estudio es la del compostaje.

²² (Cuéllar, R; Dussán, J; Vargas, P, 2004)

²³ (van Deuren et al.1997)

²⁴ (Riser-Roberts 1998)

²⁵ (Van Deuren et al. 1997)

²⁶ (Torres y Zuluaga, 2009; Morelli, 1999)

2.4.3 Técnica de Compostaje.

El compostaje es el proceso de descomposición aeróbica y térmica de residuos orgánicos a través de poblaciones de microorganismos que existen en los propios residuos y con los obtenidos en caldos microbianos, bajo condiciones controladas, para producir abono orgánico que aplicado en suelos influye de manera favorable en el aspecto fisicoquímico y biológico, mediante el aporte de nutrientes directamente asimilables y en poblaciones microbianas degradadoras de los contaminantes presentes en dicho suelo.

Ilustración 6. Técnica de Compostaje.



(Aguilera Bazaes & Vásquez Bustamante, 2014)

Las aplicaciones más comunes del composteo incluyen el tratamiento de residuos agrícolas, de desechos de jardinería y cocina, de residuos sólidos municipales y de lodos. Sin embargo, desde hace unos 5 años, investigaciones a nivel laboratorio, piloto y a gran escala, han demostrado que el proceso de composteo, así como el uso de composta madura, es una solución de bajo costo y tecnológicamente efectiva para remediar suelos contaminados por residuos orgánicos peligrosos como los TPH, solventes, explosivos, pesticidas e HAP²⁷.

Las estrategias de biorremediación por composteo, se basan en la adición y mezclado de los componentes primarios de una composta (agentes de volumen) con el suelo contaminado, de manera que conforme la composta madura, los contaminantes son degradados por la microflora activa dentro de la mezcla. Los sistemas de composteo incluyen fosas en el suelo, reactores cerrados (tambores

²⁷ (Eweis et al. 1998; Semple et al. 2001)

rotatorios, tanques circulares), recipientes abiertos, silos, biopilas alargadas y biopilas estáticas²⁸.

2.4.3.1 Sistemas de composteo.

En la práctica y en general una de las tecnologías de composteo más utilizada para el tratamiento de extensas áreas de suelos contaminados, principalmente por HTP, se lleva a cabo en condiciones aerobias y se conoce como biopilas, bioceldas o pilas de composteo²⁹. Las biopilas, son una forma de composteo en el cual se forman pilas con el suelo contaminado y agentes de volumen. El sistema, que puede ser abierto o cerrado, se adiciona con nutrientes y agua y se coloca en áreas de tratamiento, que incluyen sistemas para coleccionar lixiviados y alguna forma de aireación³⁰.

La elección del tipo de sistema de biopilas depende principalmente de las condiciones climáticas y de la estructura de los compuestos orgánicos volátiles presentes en el suelo contaminado. Dos de los sistemas de biopilas más empleados son:

- **Biopilas alargadas**

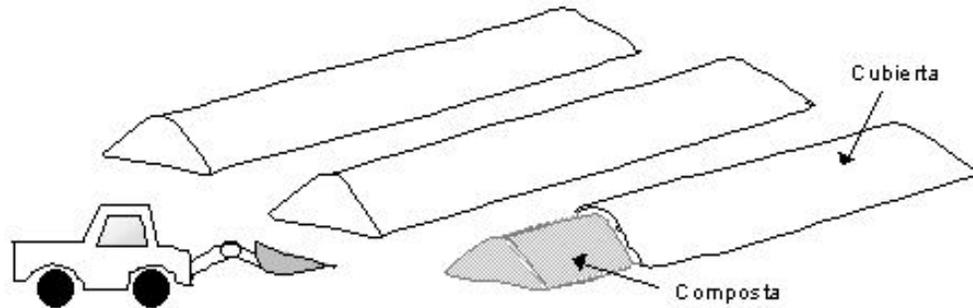
El sistema de biopilas alargadas es el proceso de composteo más económico y sencillo. En éstas, el material a compostear se apila sobre una plataforma en montones alargados. En este tipo de biopila, la aireación se realiza mediante el mezclado manual o mecánico de la composta, proceso que a su vez permite homogeneizar la temperatura. El mezclado de la composta proporciona una mayor distribución y facilita la biodegradación de los contaminantes, ya que permite la homogeneización de los nutrientes, agua, aire, contaminantes y microorganismos.

²⁸ (Semple et al., 2001)

²⁹ (Iturbe – Argüelles et al. 2002)

³⁰ (Eweis et al. 1998)

Ilustración 7. Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas.

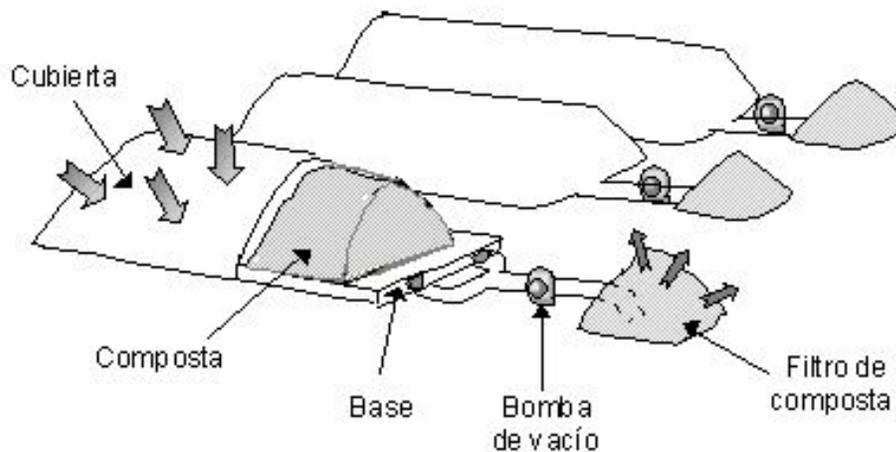


(Trejo & Sepúlveda, 2007)

- **Biopilas estáticas**

A diferencia de las anteriores, las biopilas estáticas no necesitan mezclarse mecánicamente, ya que la aireación y homogeneización del calor en la composta se lleva a cabo por medio de un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire, mediante tubos colocados en la base alineados paralelamente a lo largo de la pila. En las biopilas estáticas, normalmente se emplea un sistema de extracción de aire, ya que ello permite la captura de los vapores de cierta fracción de compuestos orgánicos volátiles que llegan a ser removidos del suelo contaminado durante el proceso de aireación.

Ilustración 8. Representación esquemática de un sistema de biopilas estáticas.



(Trejo & Sepúlveda, 2007)

2.4.3.2 Factores a considerar en el diseño de una biopila.

Las condiciones óptimas y el éxito de un proceso de composteo dependen de diversos parámetros, los cuales pueden resumirse en tres categorías: las características del suelo, las condiciones climáticas y las características de los contaminantes. Una de las ventajas que ofrece la tecnología ex situ como es el caso de las biopilas es que estas condiciones pueden ser controladas. Los parámetros que deben considerarse y controlarse para aumentar la eficiencia de un proceso de composteo se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Parámetros a considerar y rangos óptimos durante un proceso de composteo para tratamiento de suelos contaminados por compuestos orgánicos.

Parámetro	Rango óptimo
Humedad	40 -85%; 50 - 80% de la capacidad de campo
pH	6 - 8; con un óptimo de 7
Relación de nutrientes (C:N:P:K)(a)	100:(3.3-10):(0.5-1):(0.1-1)
Relación C/N; C/P; C/K(b)	10 - 30; 100 - 200; 100 - 1000
Relación suelo:aditivos (peso seco)	1.5:1 a 3:1
Temperatura	25 - 35 °C
Contaminante(s)	< 50,000 mg/kg
Metales tóxicos	< 2,500 mg/kg
Cuenta bacteriana	> 1,000 UFC(c)/g suelo seco

(Trejo & Sepúlveda, 2007)

2.4.3.3 Ventajas del composteo.

- Son sistemas económicamente factibles, comparados con las tecnologías térmicas y fisicoquímicas tradicionales.
- Son tecnologías relativamente simples, comparadas con la mayoría de las tecnologías tradicionales. El diseño y construcción de las biopilas son relativamente sencillos.

- Pueden considerarse estrategias efectivas y ambientalmente “amigables”, ya que biotransforman parcial o totalmente los contaminantes en biomasa y productos estables e inoos.
- El objetivo del composteo es la biodegradación (destrucción) y detoxificación de contaminantes, mientras que otras tecnologías, como la adsorción en carbón activado, el lavado, el confinamiento y solidificación/estabilización, únicamente transfieren los contaminantes de un medio a otro. Una consecuencia común de la actividad microbiana es la detoxificación de químicos tóxicos.
- El suelo biorremediado con el uso de sistemas de composteo, no necesita ser confinado posteriormente.

2.4.3.4 Desventajas del composteo.

- Está limitado a contaminantes orgánicos.
- Concentraciones muy altas de contaminantes pueden resultar tóxicas e inhibir la biodegradación. En el caso de hidrocarburos (HTP), es recomendable que la concentración no exceda 50,000 ppm. Por otra parte, concentraciones de metales pesados mayores a 2,500 ppm pueden inhibir el crecimiento microbiano.
- Una disminución en la actividad microbiana provoca una disminución en la degradación y aumenta el periodo del tratamiento. Por ello, el éxito del proceso depende de la capacidad para crear y mantener las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento microbiano.
- Existe el riesgo de que ciertos compuestos originalmente inoos, puedan ser convertidos en productos tóxicos para una u otra especie.
- Es necesario contar con un espacio adecuado para montar los sistemas.
- El suelo contaminado debe excavarse, lo que puede provocar la liberación de compuestos orgánicos volátiles.
- El arrastre de vapores durante el proceso de aireación requiere de tratamiento antes de descargar a la atmósfera.

2.4.4 Biorremediación de hidrocarburos en suelos.

El crecimiento de la demanda energética a nivel mundial ha llevado durante las últimas décadas, a un incremento del uso de los productos del petróleo lo que hace aumentar las probabilidades de derrames y accidentes que tienen relación con el petróleo³¹.

³¹ (Vreysen, et al., 2005)

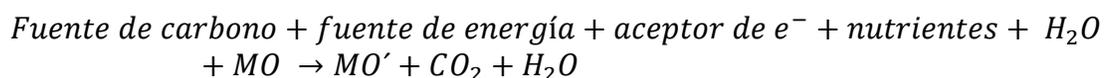
La Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos es un proceso natural que aprovecha la habilidad de los microorganismos para degradar los contaminantes orgánicos presente en dichas sustancias con el propósito de disminuir la concentración de una mezcla de compuestos tales como el petróleo y sus derivados.

La tasa de biodegradación de hidrocarburos en ambientes naturales como el suelo, generalmente, es más reducida comparada con la actividad en un laboratorio experimental³² sugiriendo que la actividad microbiana se ve afectada por diferentes parámetros del suelo. La biodegradación de hidrocarburos en suelos depende de una infinidad de factores abióticos que afectan tanto a la cantidad de crecimiento microbiano como a la actividad enzimática lo que influye directamente en la tasa de biodegradación de hidrocarburos, entre los principales factores se encuentra: concentración, fracción y madurez de los hidrocarburos, de las poblaciones microbianas, propiedades del medio donde se ha vertido, tales como: temperatura, oxígeno, humedad, disponibilidad de nutrientes³³.

El derrame de hidrocarburos en suelos se caracteriza principalmente por el movimiento vertical a lo largo del terreno más que un esparcimiento horizontal (contrario a lo que sucedería en un derrame marino). La infiltración del hidrocarburo en el suelo disminuye las pérdidas por evaporación de los compuestos volátiles lo que puede hacer la actividad de los microorganismos.

2.4.5 Biorremediación a fin de disminuir niveles de TPH en suelos

Para aumentar la eficiencia de la disminución de TPH en suelos, comúnmente se han desarrollado proyectos de biorremediación usando bacterias u otros elementos orgánicos sobre los suelos contaminados. La biorremediación puede ser definida como un proceso de ingeniería el cual usa mecanismos bioquímicos en organismos para degradar ambientes de suelos contaminados y convertirlos en productos finales menos complejos y menos dañinos como lo son el dióxido de carbono y el agua. Para llevar a cabo la reacción en una remediación se requiere lo siguiente:



³² (Martienssen, et al., 2007)

³³ (Raffaldi, et al., 2005; Mohn, et al., 2000)

Lo que busca la degradación de los Hidrocarburos mediante la utilización de microorganismos es descomponer largas cadenas de hidrocarburos en compuestos más sencillos y que generen el menor impacto sobre el medio ambiente.

En fase sólida (compostaje) se considera como un método de aplicación ex situ, 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.

2.5 ABONO ORGÁNICO CEAGRODEX

El abono que se va a emplear en la ejecución de este proyecto es fabricado por la empresa huilense CEAGRODEX bajo la técnica del compostaje, es netamente orgánico, el cual se genera a partir de la descomposición de estiércol y contenido ruminal, restos de animales bovinos, lodos PTAR, material vegetal como restos de podas (ramas, hojas, césped), cáscaras de frutas-hortalizas y cal. Actualmente la aplicación del compostaje se emplea en la regeneración de la vida microbiana de la tierra en donde se mejora la textura y composición química del suelo. (Para ver toda la información acerca del Abono de la empresa CEAGRODEX, remitirse al Anexo 1)

2.5.1 Proceso

La idea de fabricar un abono 100% orgánico nació en el año 2010, mediante el procesamiento de diferentes materiales generando pilas, las cuales deben de pasar por diferentes etapas, mediante el diario rocío de microorganismos creados por la misma empresa con el fin de humedecer las pilas y acelerar el proceso de degradación, además del volteo de las pilas el cual se realiza cada 3 días. Todo el proceso dura 4 meses, para al final obtener dicho abono.

2.5.2 Composición

Tabla 5. Ficha técnica general de abono CEAGRODEX

Carbono orgánico oxidable total	27.7 %
Cenizas	41.8 %
CIC (Capacidad de intercambio catiónico)	39.8 mEq/100 g
Capacidad de retención de humedad	192%
Calcio	2.45 %
Nitrógeno orgánico total (N)	2.56 %
Fósforo total (P ₂ O ₅)	2.55 %
Potasio total (K ₂ O)	0.51 %
Sodio (Na)	1.05 %
Humedad	35.5 %
pH	7.23
Densidad	0.19 g/cm ³
Metales pesados	Contenido de metales pesados por debajo de los límites establecidos en la norma.
Salmonella spp	Ausente
Entero bacterias	<10 ufc/g

(Lizcano, 2011)

2.5.3 Características Fisicoquímicas

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas del abono CEAGRODEX

ESTADO FÍSICO	Sólido de granos irregulares	
Humedad	35.5	%
Cenizas	41.1	%
Carbono oxidable	27.0	%
Capacidad de intercambio Catiónico	39.8	ME/100 gr

C/N	14.5	
Capacidad de retención de humedad	192	%
Densidad	0.19	gr/cm ³
pH	7.23	
Nitrógeno Total (N)	1.86	%
Fósforo Total (P₂O₅)	1.701	%
Potasio (K₂O)	0.4333	%
Color	Café	
Olor	Amoniacal y a geosminas (olor a tierra fértil).	

(Lizcano, 2011)

2.5.4 Análisis Microbiológico

Tabla 7. Microorganismos presentes en abono de CEAGRODEX

Mesófilos Ufc/g	Termófilos Ufc/g	Mohos Ufc/g	Levaduras ufc/g	Nematodos y/o protozoos	Enterobacterias Ufc/g	Salmonella En 25 gr
1,80E+10	2,10E+11	1,00E+10	0,00E+00	ausentes	0,00E+00	ausentes

(Lizcano, 2011)

2.5.5 Beneficios

- Nivel biológico

Aumenta la flora microbiana beneficiosa.

Aumenta la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades

- Nivel físico

Mejora la aireación y capacidad de retención de agua y nutrientes.

Mejora la capacidad de germinación de las semillas.

Reduce la erosión del suelo.

Mejora el manejo del suelo.

- Nivel químico

Enriquece el suelo de sustancias orgánicas y minerales esenciales.

Promueve la asimilación de los nutrientes transformándolos en formas asimilables.

Conserva y eleva el contenido orgánico de los suelos.

2.5.6 Influencia del abono en biorremediación de hidrocarburos.

Existe una gran diversidad de materiales que son utilizados como fuente de materia orgánica al suelo y que pueden ser aplicados en forma fresca o bien luego de un proceso de preparación, como abonos orgánicos (López, 1994). Dependiendo de la actividad que los produce, estos materiales pueden ser de origen agrícola, ganadero, forestal, industrial y urbano. Por lo general, los abonos orgánicos, son producidos a partir del proceso de compostaje con el afán de mejorar la calidad del suelo (López, 1994; Durán y Henríquez, 2007). Durán y Henríquez (2007) sugieren que el tipo materia prima utilizada para la elaboración de los abonos orgánicos determinará en mucho las características finales del material.

El proceso de compostaje se emplea en la agricultura como mejorador de suelos, pero también puede usarse en la remoción de contaminantes, entre ellos algunos hidrocarburos y plaguicidas (Sauri-Riancho y Castillo-Borges, 2002; Velasco-Trejo y Volke-Sepúlveda, 2003). Como consecuencia de las transformaciones del material y de las diversas sucesiones que se realizan durante el composteo, se genera una alta diversidad microbiana, con poblaciones mayores que la de los suelos fértiles y o los suelos muy perturbados o contaminados (Velasco-Trejo y Volke-Sepúlveda, 2003). Por ello, es de esperar que la adición de composta incremente de forma importante las poblaciones microbianas.

Además, estudios sobre la degradación de hidrocarburos han demostrado que algunos microorganismos son extremadamente versátiles en la catabolización de moléculas recalcitrantes, por lo que son aprovechados para biorremediar y fitorremediar algunos sistemas ambientales contaminados por derrames de petróleo (Carpena y Bernal, 2007).

Por su parte, Aguilar-Benítez *et al.* (2012), aseguran que la aplicación de los abonos orgánicos aumenta la materia orgánica del suelo y mejora algunas de sus características físicas como: la cantidad de agregados hidro-estables, la densidad

aparente y la porosidad, que favorecen el flujo de aire y agua y el desarrollo radicular de las plantas.

Todas estas razones hacen del abono un agente biodegradable ideal para reducir los niveles de contaminación que se puede llegar a presentar por parte de los hidrocarburos.

2.6 DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS

2.6.1 Degradación del petróleo.

La elevada complejidad de la composición del crudo de petróleo y derivados, implica la existencia de una amplia capacidad enzimática si se quiere conseguir una degradación significativa del crudo. La mayor parte de los estudios realizados se han llevado a cabo con cepas bacterianas individuales o con la combinación de diferentes cepas aisladas (Bayona et al., 1986). En la mayoría de los casos, son degradadoras de alcanos, debido a que los alcanos son los componentes más abundantes del crudo de petróleo. No obstante, en algunos casos, estas cepas tienen la capacidad de oxidar selectivamente las cadenas alquílicas de ciertos PAH's alquilados, compuestos abundantes en el crudo (Davis y Raymond, 1961).

Recientemente, se han descrito algunas cepas con la capacidad de degradar tanto PAH's de elevado peso molecular como alcanos (Churchill et al., 1999), pero ésta, no parece que sea una norma general. De hecho, los degradadores de alcanos citados habitualmente en la bibliografía generalmente no son capaces de romper el anillo aromático de los PAH's, mientras que los degradadores de PAH's generalmente no crecen con alcanos (Foght et al., 1990).

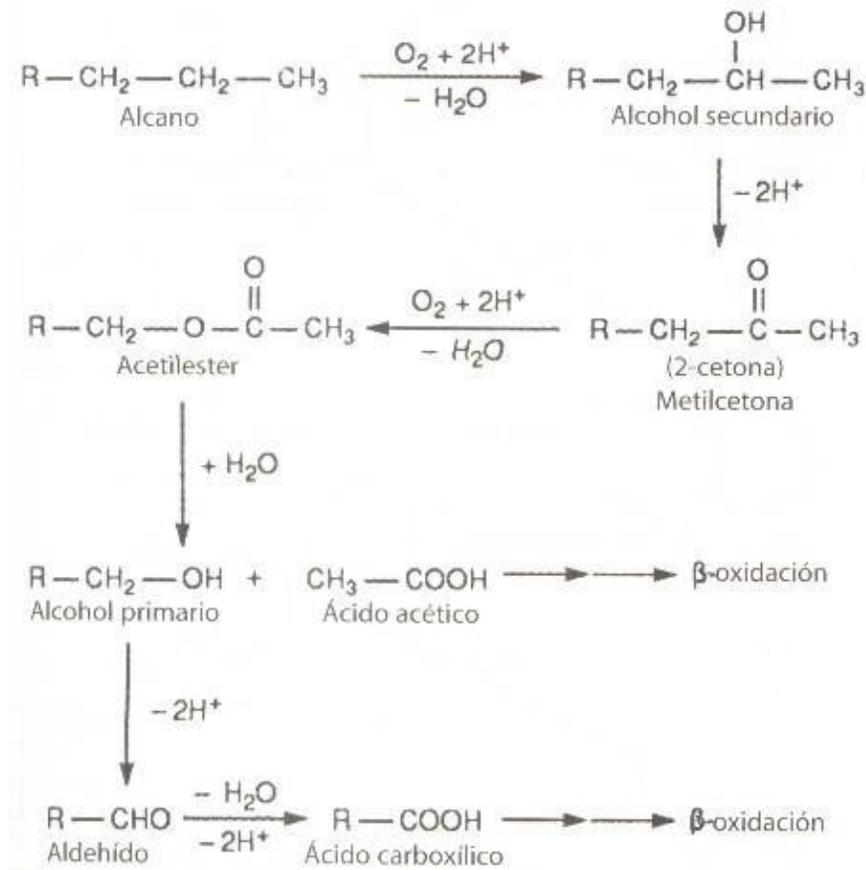
2.6.2 Degradación de hidrocarburos alifáticos en procesos aeróbicos

Los hidrocarburos alifáticos los podemos clasificar en alcanos, alquenos y alquilos dependiendo de lo saturados que estén sus enlaces. Como norma general decir que como más insaturado sea una cadena carbonatada (más dobles y triples enlaces) más difícil o lenta será su degradación. De igual manera los alcanos de cadena larga son más resistentes a la biodegradación a medida que la longitud de su cadena aumenta. Cuando alcanzan un peso molecular superior a 500 dejan de servir como fuente de carbono para el crecimiento microbiano. En general también la presencia de ramificaciones reduce la tasa de biodegradación porque los

átomos de carbono terciario y cuaternario interfieren con los mecanismos de degradación o lo bloquean totalmente (Salgado et al, 2008).

Los microorganismos que utilizan hidrocarburos como sustrato actúan en presencia de enzimas denominada monooxigenasas y/o dioxigenasas. La mayoría de los microorganismos en teoría, si son capaces de sobrevivir en ese ambiente pueden degradar sin más problemas hidrocarburos de cadena larga. Para que sea de fácil comprensión y sin entrar en demasiados detalles metabólicos podemos decir que para que los microorganismos puedan degradar alcanos primero deben de oxidar con oxígeno el último carbono de la molécula gracias al complejo multienzimático que no hacen más que incorporar esta molécula de oxígeno. Así se obtiene un hidrocarburo con un grupo alcohol siendo así una molécula más reactiva. Mediante otras enzimas este grupo alcohol se oxida más hasta grupo aldehído y finalmente carboxílico. Así se obtiene una molécula similar a un ácido graso y puede ser degradado a acetil-CoA por b-oxidación. Este proceso de oxidación también puede darse en carbonos no terminales dando lugar a dos ácidos grasos que se procesarán por b-oxidación (Janssen et al, 2001).

Ilustración 9. Proceso de degradación de n-alcános.

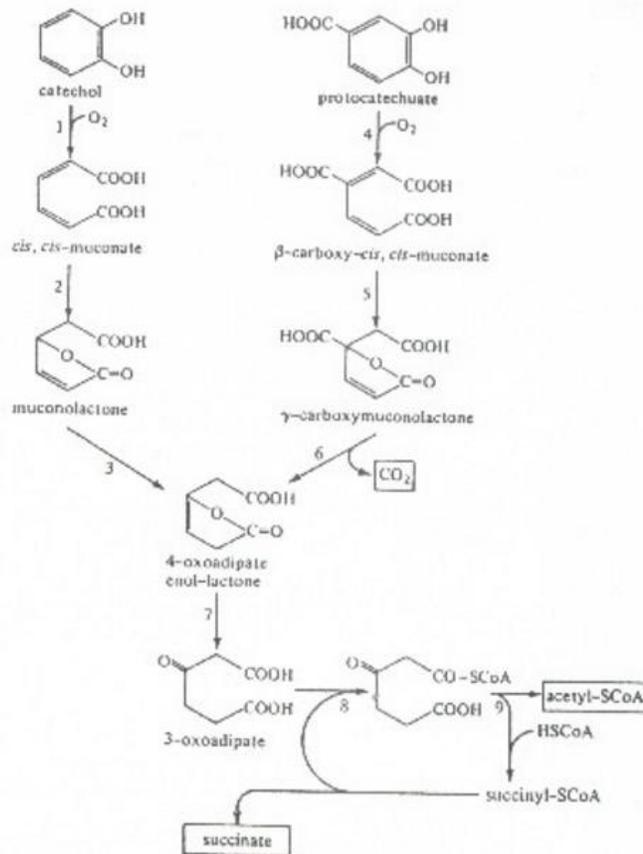


(Salgado, 2008)

2.6.3 Degradación de hidrocarburos aromáticos en ambientes aeróbicos

En el caso de los hidrocarburos aromáticos, el principal problema para degradarlos es romper estos anillos aromáticos que pueden ser muy variados. Los microorganismos que utilizan estos compuestos aromáticos como fuente de carbono, lo que hacen es que en lugar de utilizar una enzima mono-oxigenasa específica para cada molécula diferente, utilizan unas vías bioquímicas llamadas vías altas o periféricas que consisten en modificar los diferentes anillos aromáticos absorbidos en protocatechuate⁴ y catecol. Es decir, la gran variedad de compuestos aromáticos que se pueden encontrar son modificados y convertidos a estas dos moléculas. A partir de estas dos moléculas que convergen todos los compuestos, ya se puede llevar a cabo el rompimiento del anillo mediante enzimas específicas. Esta segunda fase en la degradación sería lo que se conocería como vías bajas. La parte derecha de la ilustración ilustra la ruta metabólica de estas vías bajas.

Ilustración 10. Degradación de Hidrocarburos aromáticos en presencia de oxígeno.



(Mroziak, A et al, 2002)

2.7 IMPLICACIÓN AMBIENTAL DE LOS DERRAMES EN SUELOS

A través del tiempo, se ha incrementado el cuidado y la preservación del medio ambiente, la naturaleza, cuerpos de agua, flora y fauna y demás elementos que conforman nuestro hábitat, esto gracias a diferentes campañas informativas y educativas que poco a poco se han encargado de concientizar a la humanidad de la importancia de mantener limpio y estable la tierra que nos rodea, evitando en lo más posible la manipulación y alteración de esta.

Con la actividad continua de las industrias alrededor del mundo, se ha evidenciado un aumento en la producción de desechos que, de manera indirecta aumenta la contaminación del ecosistema; por lo que se han implementado distintas medidas para remediar los daños y evitar consecuencias severas para la naturaleza.

Teniendo en cuenta que la industria petrolera es una de las industrias que causa de una u otra manera alteraciones en el entorno de sus operaciones y por ende genera residuos, ha surgido la necesidad de mitigar y remediar las superficies que se han visto afectadas; Lo que ha generado un gran interés en la industria petrolera, en las instituciones gubernamentales y privadas y organizaciones ambientalistas, por descubrir nuevas técnicas en pro de la remediación de suelos en lugares con presencia de hidrocarburos, teniendo como base que el conocimiento del tipo de contaminación y su concentración, es fundamental para establecer las condiciones del sitio, el riesgo que representa y la selección de posibles tecnologías de recuperación.

La medición de la cantidad de hidrocarburos totales presentes (TPH) en suelos contaminados con residuos de hidrocarburos ha cobrado importancia en la actualidad. Las personas encargadas de estudiar este potencial daño ambiental, determinaron que los elementos biológicos presentes en algunas zonas han contribuido a la degradación a largo plazo, de los contaminantes depositados en zonas afectadas por derrames de hidrocarburos, concluyendo que la cantidad de TPH en suelos sea un buen indicador de la correcta degradación de los elementos contaminantes contenidos en los hidrocarburos.

2.8 LEGISLACIÓN AMBIENTAL

La normatividad ambiental proferida a nivel mundial con respecto a la protección del recurso suelo, es relativamente nueva. Hasta los años 1970 sólo se hablaba de la contaminación del aire y del agua, y al suelo se le atribuía una capacidad de autodepuración casi infinita (Silva y Correa, 2009). En 1972, seguida del desarrollo de estudios de investigación en torno a la susceptibilidad de algunos suelos de degradación, se emite en Europa la declaración llamada “Carta europea de suelos”, que define al suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad, sobre el que viven hombres, animales y plantas; calificándolo como fácilmente destructible, por ende la necesidad urgente de generar acciones tendientes a su conservación (Solano, 2005).

Posteriormente, en la cumbre de Río de Janeiro (1992), se reconoce la importancia de la protección del suelo con miras a alcanzar un verdadero desarrollo sostenible, haciendo énfasis en la prevención y control de acciones antrópicas que generan procesos de contaminación y degradación. En el mismo año, se desarrollaron dos convenios muy importantes: el de diversidad biológica y el de cambio climático, los cuáles reconocieron aspectos fundamentales como la estrecha relación que existe entre el recurso suelo y los ecosistemas estratégicos

que albergan la diversidad continental, así como la importancia del mantenimiento de la materia orgánica del suelo para la captura de carbono desde la atmósfera.

En 1994 tras la convención de las Naciones Unidas por la lucha contra la desertificación, se generaron medidas tendientes a evitar y reducir la degradación del suelo, rehabilitar terrenos parcialmente degradados y recuperar tierras desertificadas; ya que estos aspectos ambientales tienen una estrecha relación con la pobreza, la inseguridad alimentaria, la pérdida de la diversidad biológica y el cambio climático (Silva y Correa, 2009).

La EPA (Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos) a partir de resultados de investigación, ha emitido diversas normativas donde se establecen los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes en el suelo, con el fin de que se tengan en cuenta a la hora de diagnosticar, mitigar y controlar los impactos causados, así como sancionar a los responsables. Otras cumbres como la de Johannesburgo (2002) sobre diversidad biológica y Copenhagen (2009) sobre cambio climático, refuerzan la idea de la conservación del suelo con miras a alcanzar el verdadero desarrollo sostenible.

2.8.1 Legislación ambiental en Colombia.

Colombia en cuanto a la contaminación de suelos y niveles permisibles de contaminantes en éste no cuenta con una legislación pertinente, por lo que se hace referencia a disposiciones nacionales de protección del medio ambiente y recuperación de medios afectados por contaminación y a normas internacionales en ciertos casos.

En materia de protección del medio ambiente, la legislación colombiana se encuentra concentrada en torno al Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio – CRN, Decreto 2811 de 1974, del cual, en materia de suelos se puede hacer referencia a disposiciones generales de preservación del medio ambiente y restauración de daños ocasionados por su explotación y/o utilización.

En el artículo 65 del CRN, expresamente, “se prohíbe descargar sin autorización los residuos, basuras y desperdicios, y en general, de desechos que deterioren los suelos o, causen daños o molestias a individuos o núcleos humanos”. En el mismo decreto igualmente se establece:

- Art. 178: Los suelos del territorio nacional deberán usarse de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos.
- Art. 179: El aprovechamiento de los suelos deberá efectuarse en forma de mantener su integridad física y su capacidad productora. En la utilización de los suelos se aplicará normas técnicas de manejo para evitar su pérdida o degradación, lograr su recuperación y asegurar su conservación.
- Art. 180: Las personas que realicen actividades agrícolas, pecuarias, forestales o de infraestructura, que afecten o puedan afectar los suelos, están obligadas a llevar a cabo las prácticas de conservación y recuperación que se determinen de acuerdo con las características regionales.
- Art. 183: Los proyectos de adecuación o restauración de suelos deberán fundamentarse en estudios técnicos de los cuales se induzca que no hay deterioro para los ecosistemas. Dichos proyectos requerirán aprobación.

Ante la ausencia de legislación pertinente a los niveles máximos permisibles de TPH en suelos, muchos estudios al respecto toman como valor objetivo el recomendado por el Instituto Americano de Petróleo (API), de un 1% P/P (10.000 ppm.), el cual está basado principalmente en la toxicidad para las plantas y la movilidad de los hidrocarburos hacia aguas subterráneas, sin embargo, muchos estudios realizados en Colombia se encuentran cobijados bajo la norma Louisiana 29B, en la cual se establece como valor máximo permitido de contenido de TPHs de un 3%.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1 LOCALIZACIÓN

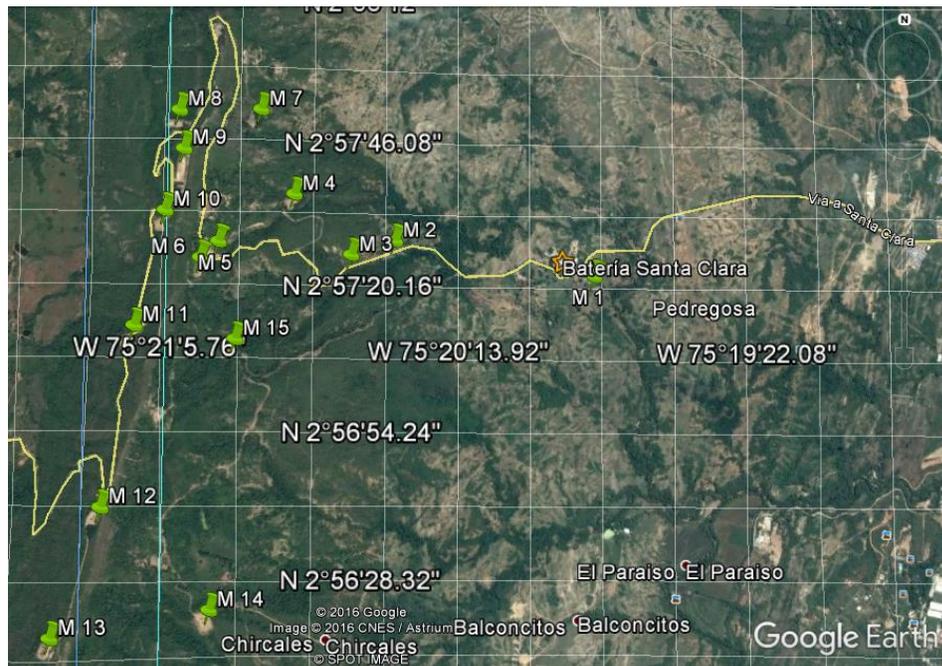
La zona escogida para la realización de la toma de muestras necesarias para el desarrollo del proyecto investigativo se eligió, debido a las actividades que se realizan en los sectores aledaños, en donde el fallo de los equipos en la batería o en pozo generarían un posible derrame de hidrocarburos y además por la cercanía con un cuerpo de agua conocido como La Raya, seca, tributarias de la Quebrada Quisinde la cual desemboca en el Rio Magdalena, lo cual permite la presencia de

sedimentos y una carga orgánica importante, dando lugar a que haya una mejoría en el proceso de remediación.

Inicialmente, se realizó un recorrido por la zona donde se encuentran los Campos Santa Clara y Palermo, con la intención de obtener muestras de suelos que se encontraran contaminadas con sustancias procedentes de la actividad petrolera; sin embargo, no se encontraron hallazgos de suelos contaminados aún en la zona de contrapozos, ya que la industria a través de los años ha implementado las medidas necesarias para mantener las zonas aledañas a su actividad libres de contaminación y preservando así el entorno acoplándose a las exigencias de la ley. Por esta razón se hizo necesario la extracción de muestras de suelos libres de contaminación “limpias”, que posteriormente fueron contaminadas con crudo procedente de la misma locación; simulando lo que sería un suelo afectado por las actividades propias de la obtención de los hidrocarburos.

Se seleccionaron quince puntos de muestreo (Ilustración 11) georreferenciados con sus respectivas coordenadas (Tabla 8) a lo largo de la vía que comunica las diferentes locaciones de los campos Santa Clara y Palermo con la Batería de Santa Clara la cual se encuentra al servicio actualmente de Hocol, ubicada a las afueras de la ciudad de Neiva, en cercanías con el municipio de Palermo.

Ilustración 11. Mapa ubicación de toma de muestras.



(Fotografía base tomada Google Maps, 2016)

Tabla 8. Coordenadas puntos toma de muestras.

MUESTRA	LATITUD (N)	LONGITUD (O)	Tipo de muestra	Lugar toma de muestra	Descripción de la zona
1	2°57'20"	75°19'50"	Limpio	Finca La Bonita	Zona de suelos áridos con presencia de algunos arboles y plantas rastreras
2	2°57'26"	75°20'26"	Limpio	Carretera	Zona seca, de suelos pedregosos junto a la vía pavimentada, rodeada de arboles y vegetación.
3	2°57'23"	75°20'34"	Limpio	Carretera	Zona rodeada de arboles y vegetación a los costados de la carretera, suelo arenoso.
4	2°57'34"	75°20'44"	Limpio	Locación en abandono	Zona de actividad petrolera en estado de abandono, suelo árido y pedregoso, sin vegetación.
5	2°57'25"	75°20'57"	Limpio	Carretera	Zona seca, de suelos pedregosos con poca vegetación y presencia de plantas rastreras.
6	2°57'22"	75°20'59"	Limpio	Pozo Santa Clara 5	Zona de actividad petrolera en estado de operación, suelos Arenosos en la cercanía, poca vegetación.
7	2°57'49"	75°20'51"	Limpio	Locación en abandono	Zona de actividad petrolera en estado de abandono, con poca vegetación, suelos arenosos.
8	2°57'48"	75°21'04"	Limpio	Pozo Santa Clara 3	Zona de actividad petrolera en estado de operación, arboles y vegetación a sus alrededores; suelo pedregoso.

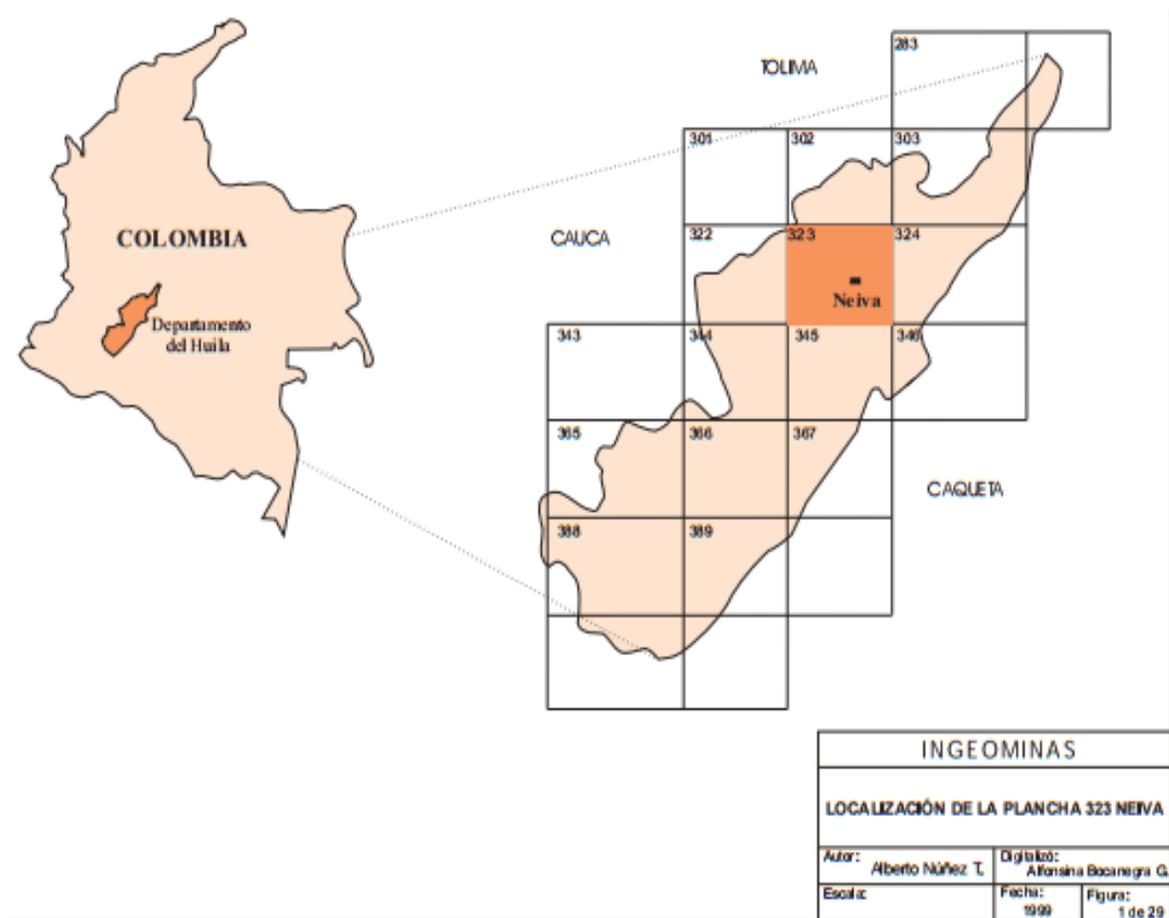
9	2°57'41"	75°21'03"	Limpio	Locación en abandono	Zona de actividad petrolera en estado de abandono, algunas plantas rastreras presentes en suelos arenosos en sus alrededores.
10	2°57'30"	75°21'06"	Limpio	Locación en abandono	Zona de actividad petrolera en estado de abandono, suelos áridos y pedregosos. Sin vegetación.
11	2°57'10"	75°21'11"	Limpio	Carretera	Zona de vocación agrícola y ganadera ubicada frente a la carretera; suelos con presencia de pasto y animales rumiantes.
12	2°56'39"	75°21'16"	Limpio	Pozo Palermo 2	Zona de actividad petrolera en estado de operación, con presencia de pocas plantas rastreras en suelos pedregoso.
13	2°56'17"	75°21'24"	Limpio	Pozo Palermo 5	Zona de actividad petrolera en estado de operación, se encuentran variedad de árboles en sus alrededores y suelo de tipo arenoso.
14	2°56'21"	75°20'58"	Limpio	Pozo Santa Clara 1	Zona de actividad petrolera en estado de operación, suelo pedregoso, con poca presencia de vegetación.
15	2°57'08"	75°20'54"	Limpio	Pozo Santa Clara 2	Zona de actividad petrolera en estado de operación, suelo árido, seco y pedregoso, con presencia de árboles lejanos.

(Autores)

3.2 PLANCHA 323-NEIVA

La última versión del mapa cartográfico de Colombia dada en el año 2015, indica que el país se encuentra conformado por un total de 568 planchas geológicas, en donde cada una presenta una descripción completa acerca de la geología y estratigrafía de la zona que representa. En la presente investigación, la locación donde se desarrolló dicho estudio y análisis comprende la zona de plancha 323-Neiva, como se puede observar en la Ilustración 12 expuesta a continuación.

Ilustración 122. Localización Plancha 323 - Neiva

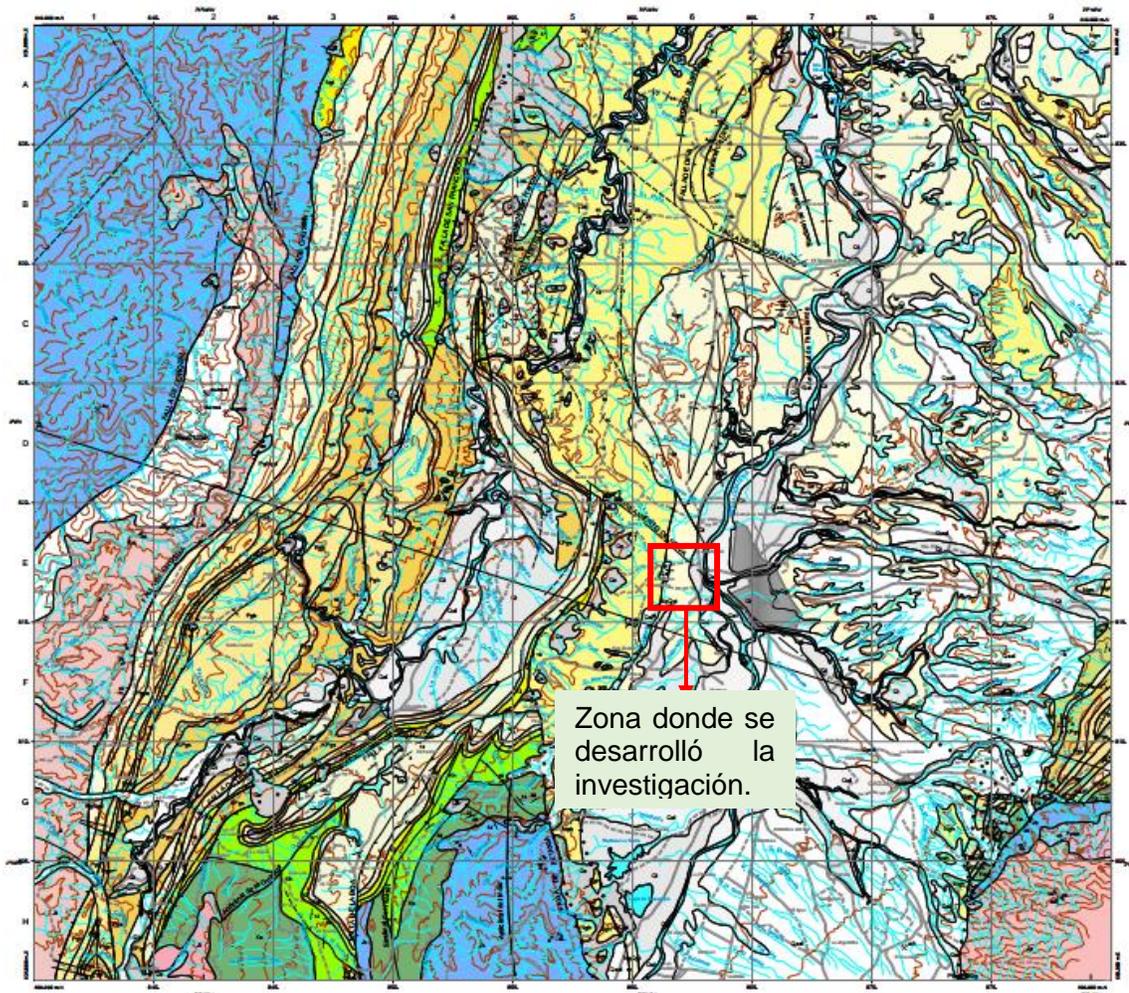


(Ingeominas, 2002)

La Plancha 323 Neiva, de la nomenclatura del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con una extensión de 1.800 km², se encuentra ubicado al norte del Departamento del Huila; según la geología presente en esta plancha

(Ilustración 13) se puede observar que cubre parte del Valle Superior del Magdalena (VSM) en la llamada Subcuenca de Neiva. En esta área afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, así como extensos depósitos inconsolidados de origen sedimentario.

Ilustración 13. Geología Plancha 323 - Neiva



(Servicio Geológico Colombiano, 2015)

Las estructuras geológicas más importantes son el Sistema de Fallas de Chusma y fallas asociadas al Sistema de Fallas de Garzón-Algeciras; estos dos sistemas marcan el límite entre las cordilleras Central y Oriental y el valle del río Magdalena, respectivamente.

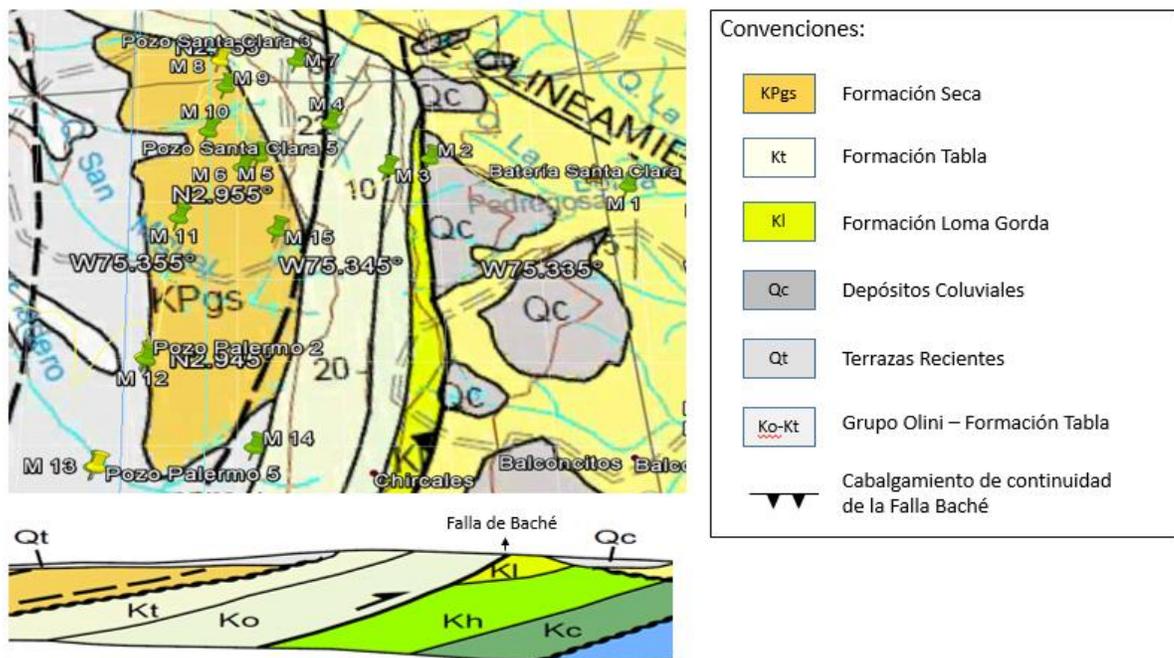
Los recursos geológicos de mayor interés corresponden a materiales de construcción como rocas ornamentales (mármol), agregados pétreos y arcillas. Los recursos calcáreos, especialmente para obtención de cal, son también importantes. Las reservas de agua subterránea son grandes, pero no han sido caracterizadas en cuanto a calidad y cantidad. Los recursos energéticos, gas y petróleo, son explotados en diferentes campos dentro del área o en zonas aledañas y las explotaciones continúan en diferentes bloques.

El territorio que cubre la Plancha 323 se afecta por fenómenos de erosión y remoción en masa, originados por las condiciones naturales de la zona y acelerados por la actividad humana. La región más crítica es el noroeste, en donde la extracción de rocas calcáreas y la apertura de vías con escasa dirección técnica son los factores que más inciden en el deterioro ambiental y los fenómenos de inestabilidad. (Ver Anexo 2).

3.2.1 Estratigrafía de la zona de estudio.

En la ilustración 14 adjunta a continuación, se puede observar la estratigrafía detallada correspondiente a la zona donde se realizó el estudio y toma de muestras empleadas en la realización del proyecto.

Ilustración 14. Estratigrafía zona toma de muestras.



(Servicio Geológico Colombiano, 2015)

En el área de estudio afloran rocas de las formaciones Loma Gorda, Grupo Olini - Formación Tabla y Seca, todas pertenecientes al mesozoico. Dichas formaciones anteriormente nombradas se encuentran conformadas de la siguiente manera:

- Formación Loma Gorda: Esta formación se encuentra compuesta por intercalaciones de lodolitas, calizas arenosas, arenitas, fosforitas y liditas en capas de tipo delgadas a medias.
- Grupo Olini - Formación Tabla: El Grupo Olini presenta paquetes de liditas, lodolitas y fosforitas en la base y el techo, se encuentran separadas por areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino propias de la Formación Tabla, las cuales son de color blanco, porosas, friables y se encuentran separadas por láminas medias de lodolitas negras.
- Formación Seca: Presenta arenisca de color gris con granulometría fina a muy fina, se encuentran separadas por capas medias de lodolitas abigarradas con restos vegetales.

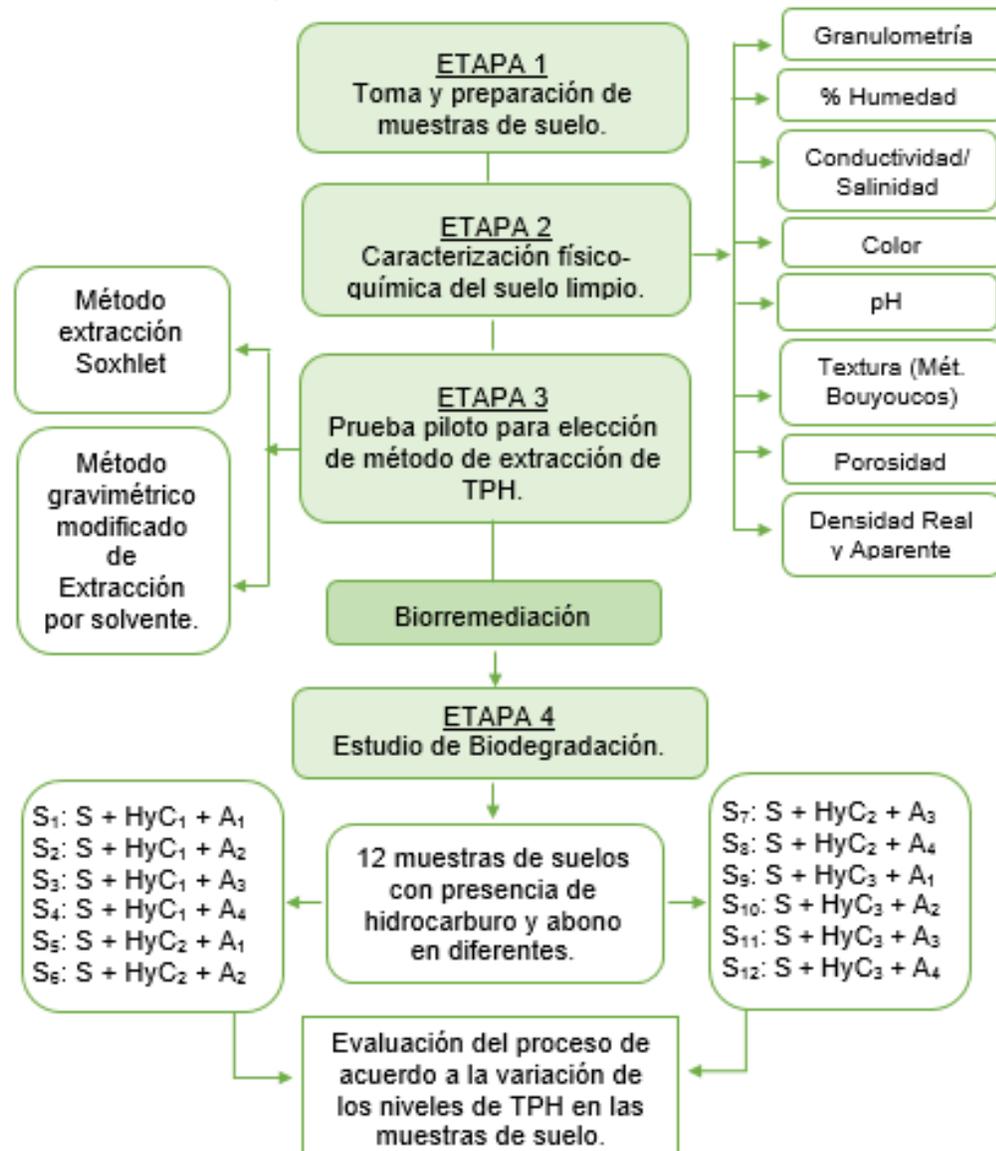
Conjuntamente se encuentran depósitos coluviales (originados por derrumbes o deslizamientos) los cuales están conformados por gravas y grandes bloques de areniscas derivados del Grupo Olini y la Formación La Tabla y en menor proporción se puede identificar arcillolitas y calizas de la formación Seca. Asimismo, hay presencia de terrazas recientes pertenecientes al cuaternario las cuales están conformadas por gravas y arenas sueltas, constituidas por cantos redondeados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias traídos y depositados por los ríos Baché, Aipe y Magdalena.

Estructuralmente se reconoce el cabalgamiento con continuidad de la Falla Baché.

4. MARCO EXPERIMENTAL

El presente estudio se desarrolló en cuatro (4) etapas principales.

Ilustración 15. Diseño experimental.



(Autores)

S₁, S₂..., S₁₂: Muestras de suelos con diferentes eventos de contaminación.

S: Cantidad de suelo limpio usado (Constante en las 12 muestras).

HyC₁, HyC₂ y HyC₃: Cantidades de hidrocarburo empleadas.

A₁, A₂, A₃ y A₄: Cantidades de abono empleadas con agente biorremediador.

4.1 ETAPA 1. TOMA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO

El día Jueves 11 de Octubre se realizó la toma de muestras de suelo en la vía que comunica la batería Santa Clara con el pozo Santa Clara 2 (Ilustración 11), se escogieron quince (15) puntos en donde el suelo a una profundidad de 15 cms se encontraba totalmente libres de contaminación con hidrocarburos, las cuales tiempo después para dar desarrollo al diseño experimental se expusieron a diferentes porcentajes de contaminación, diferentes relaciones entre suelo-abono y diferentes tiempos de interacción del suelo contaminado con el abono 100% orgánico.

La toma de muestras de suelos se efectuó siguiendo el procedimiento correspondiente (Anexo D), con el fin de tener muestras representativas como se puede detallar a continuación, finalmente se homogenizó todos los suelos seleccionados con el fin de trabajar con únicas propiedades.

Inicialmente, de cada punto se extrajo aproximadamente 500 gramos de suelo; después de haber acabado la toma de las quince muestras se dispuso como locación transitoria un kiosco ubicado en la propiedad privada denominada “La Bonita” la cual se encuentra ubicada frente de la Batería Santa Clara, en donde el día viernes 12 de octubre se dispuso a realizar la homogenización correspondiente del suelo, con el fin de trabajar con un suelo uniforme en sus propiedades tanto químicas como físicas.

Ilustración 16. Recolección Toma de muestras.



(Autores)

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO

La caracterización es un proceso dinámico que permite obtener información físico-química detallada del crudo; además de su clasificación y valor para efectos de comercialización se puede obtener una mejor planificación de sus posteriores usos.

Antes de iniciar el proceso de caracterización de un crudo se debe de conocer que el crudo que se usó era proveniente del Campo Santa Clara 3 y además saber con qué fin se quiere analizar y cómo se va a utilizar la información obtenida, es por esto que para dar desarrollo a este trabajo de grado la propiedad con la que se ha de trabajar es la densidad a presión atmosférica por el Método del Picnómetro de BINGHAM.

4.3 ETAPA 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO LIMPIO Y REMEDIADO

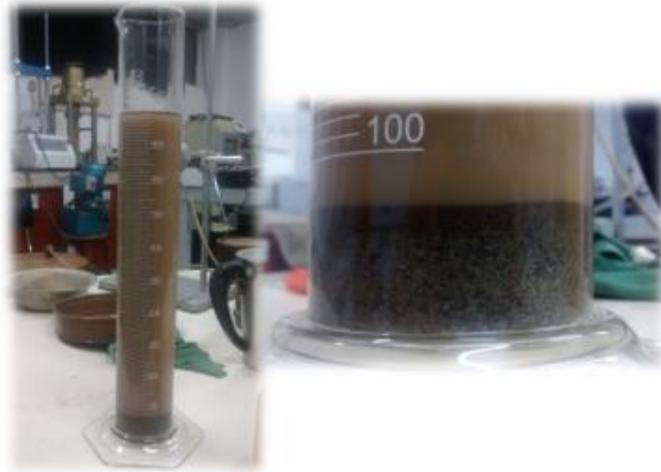
Para analizar la eficacia del abono como agente biorremediador, se realizó la caracterización tanto a nivel de propiedades físicas como químicas de una muestra de suelo limpia (libre de cualquier tipo de contaminación) y de una muestra de suelo con una carga contaminante (hidrocarburo) conocida tratada previamente con abono orgánico. Las propiedades que se evaluaron a las muestras fueron las siguientes:

4.3.1 Propiedades Físicas.

4.3.1.1 Clasificación textural usando método de bouyoucos.

El método del hidrómetro de Bouyoucos es una de las formas más rápidas para analizar el tamaño de las partículas del suelo. La muestra de suelo disperso es mezclada en un cilindro de vidrio alto con agua y una vez que se asienta, la densidad de la suspensión se puede medir con el densímetro. El tiempo que cada tamaño de partícula toma al caer, por debajo de un plano de conjunto imaginario en el cilindro puede ser medido, con las lecturas que son tomadas después de 40 segundos para medir la sedimentación de arena y después de dos horas para medir las partículas de limos. (Ver procedimiento en Anexo 3).

Ilustración 17. Prueba Método Bouyoucos.



(Autores)

4.3.1.2 Análisis mecánico del suelo (Tamizado).

Es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, denominado a la fracción menor (Tamiz No 200) como limo, Arcilla y Coloide. Se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra, esto solo separa una porción de suelo entre dos tamaños. (Ver procedimiento en Anexo 3)

Ilustración 18. Montaje para realizar tamizaje.

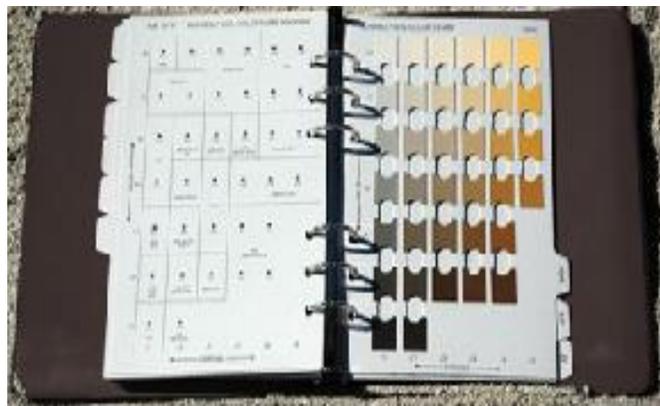


(Autores)

4.3.1.3 Color.

La forma más común utilizada en laboratorio o incluso directamente en campo es mediante el uso de tablas de color utilizando por ejemplo la escala de Munsell (1975). El color del suelo se debe determinar bajo dos condiciones: seco y cuando se ha humedecido hasta saturación. En la ilustración 16 se presenta el esquema de una hoja de las cartas Munsell. La escala de Munsell presenta series de colores expresados en función de sus tres elementos básicos, que son: el tono, el brillo y la intensidad. (Ver procedimiento en Anexo 3)

Ilustración 19. Carta Munsell.



(Autores)

4.3.1.4 Densidad del suelo

La densidad es una propiedad física de las sustancias, que indica la razón que existe entre su masa y el volumen que ocupa en el espacio. El suelo por ser un cuerpo poroso y estar constituido por tres fases, como vimos anteriormente, presenta dos condiciones de densidad: densidad real y densidad aparente.

La densidad real, es la razón entre la masa de suelo seco y el volumen de los sólidos del suelo. De ésta forma, no se tiene en cuenta el volumen que ocupan los espacios porosos ni tampoco la humedad que tiene el suelo. La densidad aparente, es la razón entre la masa del suelo seco y el volumen total del suelo (volumen de sólidos más volumen de espacios porosos), es decir que tiene en cuenta el arreglo estructural del suelo. (Ver procedimiento en Anexo 3)

4.3.1.5 Porosidad

La porosidad se da como consecuencia de la textura y estructura del suelo, y se refiere al sistema de espacios vacíos o poros en el suelo y se distinguen en macroscópicos y microscópicos. La porosidad de un suelo se puede calcular a partir de la densidad real y densidad aparente del mismo.

El siguiente cuadro indica la clasificación del suelo según su porosidad. Nótese que valores de porosidad por debajo del 40% son considerados bajos ya que el flujo de gases y agua por los espacios porosos se vuelve deficiente e inadecuado para la vida del suelo. (Ver procedimiento en Anexo 3)

Tabla 9. Clasificación del suelo según su porosidad.

Porosidad Total (%)	Clasificación
>70	Excesiva
55 – 70	Excelente
50 – 55	Satisfactoria
40 – 50	Baja
< 40	Muy baja

(Ramírez, Zuluaga, & Gómez, 2007)

4.3.1.6 Humedad

El agua que un suelo puede almacenar en sus espacios porosos se conoce como la capacidad de retención de humedad. Sobre esta agua actúan las fuerzas de adhesión, cohesión y capilar. La interacción de estas fuerzas se conoce como succión del suelo o tensión de humedad del suelo. (Ver procedimiento en Anexo 3)

Ilustración 20. Prueba análisis de humedad.



4.3.2 Propiedades Químicas

4.3.2.1 Medición de pH

La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interfase líquida del suelo. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración de iones de hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El método del potenciómetro o electroquímico para medir pH de un suelo es el más utilizado. (Ver procedimiento en Anexo 3)

Ilustración 21. Equipo para medir pH.



(Autores)

Tabla 10. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH.

Categoría	Valor de pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5

Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

(Fernández, y otros, 2006)

4.3.2.2 Conductividad y salinidad del suelo

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica que generalmente se expresa en mmhos/cm. Es una propiedad de las soluciones que se encuentra muy relacionada con el tipo de iones, sus concentraciones, su movilidad, la temperatura del fluido y contenido de sólido disueltos. La salinidad de un suelo o agua, se refiere a la cantidad de sales presentes en solución, y puede ser estimada indirectamente mediante la medición de la conductividad eléctrica (CE). De acuerdo a los valores de conductividad eléctrica, pH y concentración de sodio intercambiable, los suelos se pueden clasificar en las siguientes categorías. (Ver procedimiento en Anexo 3)

Ilustración 22. Equipo para medir Conductividad Eléctrica (CE).



(Autores)

Tabla 11. Clasificación de suelos según su CE, pH y Sodio Intercambiable.

Tipo de suelo	Conductividad (mmhos/cm)	pH	Sodio intercambiable (%)
Salino	Mayor o igual a 4	-	Menor a 15
Sódico	Menor a 4	8.5 - 10	Mayor a 15
Salino-Sódico	4	Superior a 8.5	15

(Fernández, y otros, 2006)

NOTA: En el acápite de “Análisis de resultados” se consignan los valores obtenidos en la realización de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

4.4 ETAPA 3. PRUEBA PILOTO PARA ELECCIÓN DE MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE TPH

Debido a que las muestras de suelo extraídas no presentaban ningún tipo de contaminación, fue necesario realizar una contaminación regularizada con el fin de poder realizar las pruebas pilotos y así realizar los adecuados análisis y la respectiva elección del método que más se ajustara a las condiciones presentes y los requerimientos solicitados. A continuación, en la tabla se evidencia la composición de la contaminación hecha para llevar a cabo la experimentación:

Tabla 12. Composición de la contaminación para realizar las pruebas piloto.

Elemento	Cantidad
Suelo	484,73
Hidrocarburo	125 ml (124,84 gr)

4.4.1 Método extracción Soxhlet.

Para realizar la determinación de los hidrocarburos totales de petróleos, es necesario aplicar el método para extracción de aceites y grasa SOXHLET, empleado para determinar lípidos biológicos, hidrocarburos ya sea fracciones

pesadas o relativamente polares del petróleo y cuando los niveles de grasas no volátiles pueden alterar el límite de solubilidad del solvente. El método es aplicable en aguas residuales o afluentes tratados que contengan estos materiales, o suelos previamente diluidos con algún solvente conocido.

Materiales y Equipos:

- Columna extractora y/o destiladora SOXHLET
- Matraz de bola
- Beakers de diferentes volúmenes
- Manta de calentamiento
- Cabina extractora de vapores orgánicos
- Rotavapor para recuperación del solvente
- Cartuchos de celulosa o dedales
- Horno de secado
- Desecador de vidrio
- Guantes de nitrilo, tapabocas, gafas y demás elementos de protección personal

Elementos y Reactivos:

- Muestra de Suelo contaminado
- Tolueno
- Agua para circulación y refrigeración

Procedimiento:

- Se debe colocar 100g de suelo totalmente seco y previamente molido en un cartucho de fibra de vidrio o dedal.
- Se agregan 400 ml de Tolueno al matraz de bola.
- Se coloca el cartucho donde se ha depositado la muestra de suelo dentro de la columna extractora de equipo SOXHELT.
- Realizar el ensamblaje del equipo SOXHLET e iniciar el calentamiento hasta alcanzar una temperatura de 45°C.
- Mantener el reflujo en dichas condiciones durante 4 horas, con el fin de efectuar entre 6 y 8 reflujo por hora, lo que realizará la liberación de los analitos.

- Luego de trascurridas las 4 horas, el extracto orgánico contendrá todos los hidrocarburos solubles en el tolueno. Se debe pasar el matraz de bola a un rotoevaporador y colocar el extracto orgánico a sequedad.
- Se pesa el dedal con la muestra saturada por el solvente aun y se lleva al horno de secado por 24 Horas para obtener el valor (peso) del suelo mismo.
- Por diferencia de pesos y realizando los cálculos correspondientes a la muestra seca y la muestra saturada con solvente se obtiene el valor de los hidrocarburos extraídos.

Ilustración 23. Prueba piloto Soxhlet.



(Autores)

PROCESO Y RESULTADOS DEL ENSAYO DEL “METODO SOXHLET”

La prueba experimental correspondiente al método para la determinación de aceites y grasas SOXHLET, se llevó a cabo el día 21 de septiembre de 2016, en el laboratorio de crudos y derivados de la Universidad Surcolombiana, bajo la dirección del auxiliar de laboratorio quien estuvo presente para el montaje y la producción de este.

Se ejecutó la prueba teniendo en cuenta la norma D5369- 93 ASTM 2003, Sin embargo, se realizaron ciertas modificaciones, principalmente en el uso de reactivos, ya que en el stock del laboratorio no se encontraron las sustancias originalmente requeridas (Sulfato de cloro anhidro, diclorometano y el hexano), sin embargo, se empleó como agente barredor un hidrocarburo aromático, tolueno,

cuyas características suplen y cumplen la misma función de las estipuladas en la norma.

En una columna de destilación Soxhlet se agregó una muestra de suelo a un cartucho de celulosa y se dispuso dentro de ésta, se emplearon aproximadamente 400ml de TOLUENO dispuestos en un matraz de bola colocado sobre una manta de calentamiento, todo esto conectado a la columna de destilación y a una vía de refrigeración constante, dentro de una cámara de extractora de vapores orgánicos y gases.

La prueba se desarrolló por aproximadamente 8 horas, presentando de 3 a 4 reflujos por cada hora de funcionamiento, posteriormente se pesaron tanto el conjunto del (dedal + muestra), como el solvente sobrante para realizar los cálculos pertinentes; La muestra se llevó a un horno de secado por aproximadamente 24 Horas, con el fin de evaporar todo el solvente que la impregnaba para obtener su peso final, completamente limpia.

Ya terminados la prueba por completo se llevan a cabo los diferentes cálculos teniendo en cuenta la saturación de la muestra antes y después del secado. Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 13. Condiciones iniciales prueba piloto método Soxhlet.

Elemento	Peso
Dedal vacío	10,.69 g
Suelo agregado al dedal	99.97 g
Conjunto dedal y suelo	110.49 g
Conjunto dedal y suelo saturado con tolueno	145.76 g
Tolueno	35.27 g
Densidad del crudo	0.9285 gr/cm ³

(Autores)

Tabla 14. Resultados obtenidos prueba piloto método Soxhlet.

Elemento	Peso (g)
Peso con el que se corrió la prueba	145.76 g
Peso con el que finalizó la prueba	95.31 g
Peso de la muestra fuera del dedal	82.0 g

(Autores)

Se obtuvo una diferencia de pesos entre la muestra inicial y la muestra final de 50.45 gramos.

$$145.76 \text{ g} - 95.31 \text{ g} = 50.45 \text{ g}$$

Se obtuvo una diferencia de pesos entre la muestra de suelo contaminado y la muestra final después de la extracción de 17.97 gramos.

$$99.97 \text{ g} - 82.0 \text{ g} = 17.97 \text{ g}$$

Balance Estequiométrico:

Para determinar la cantidad de hidrocarburos que hay en la muestra de suelo que se empleó, fue necesario realizar una conversión de las cantidades iniciales con las que se realizó la mezcla contaminada, Es decir, la relación (Suelo - Hidrocarburo).

Si en 484.73 g de suelo → Hay 125 ml de hcs → que pesan 124.84 g

*En 99.97 g de suelo → Hay **25.78 g** de Hcs*

Porcentaje de Hidrocarburos presentes por saturación

Tabla 15. Datos para cálculo de Porcentaje de saturación de aceite

Elemento	Peso (g)
Peso inicial muestra	110.49 g

Peso Muestra saturada	145.76 g
Peso Muestra Seca y Limpia	95.31 g
Volumen de agua en trampa	0 g (Despreciable)

(Autores)

$$\% \text{ Peso del aceite} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{peso seco} - \text{peso } H_2O}{\text{Peso inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Peso del aceite} = \frac{110.49 \text{ g} - 95.31 \text{ g} - 0}{110.49 \text{ g}} * 100 = \mathbf{13.738\%}$$

$$\rho = \frac{m}{v} \rightarrow v = \frac{m}{\rho}$$

$$v_{mz} = \frac{m_{mz}}{\rho_{mz}} = \frac{m_{crudo} + m_{Suelo}}{\rho_{mz}}$$

$$v_{mz} = \frac{m_{crudo} + m_{Suelo}}{\rho_{mz}} = \frac{m_{crudo} + m_{Suelo}}{\rho_{Crudo} + \rho_{Suelo}}$$

$$v_{mz} = \frac{25.78 \text{ g} + 99.97 \text{ g}}{0.9285 \text{ g/cm}^3 + 2.28 \text{ g/cm}^3} = 56.9377 \text{ cm}^3$$

$$\% S_o = \frac{\frac{\text{Peso Aceite}}{\rho \text{ Aceite}}}{\text{Volumen Poroso}} * 100$$

$$\% S_o = \frac{\frac{0.13738 \text{ g}}{0.9285 \text{ g/cm}^3}}{56.9377 \text{ cm}^3} * 100$$

$$\% S_o = \mathbf{0.25986 \%}$$

CONCLUSIONES DEL ENSAYO INICIAL DEL “METODO SOXHLET”

- Las trazas recuperadas de hidrocarburos presentes en el suelo por destilación en el equipo SOXHLET, fueron mínimas comparados al peso real de hidrocarburos que estaban contenidos en la muestra de suelo, lo que conlleva a tener como resultado un porcentaje de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) mínimo, no representativo y poco confiable.
- Esta prueba resulta poco práctica e ineficiente, ya que solo es posible destilar una muestra a la vez y esta demora aproximadamente 8 horas en su desarrollo, por lo que resulta compleja la realización de aproximadamente 40 muestras que se requieren analizar.
- Las sustancias químicas requeridas para la prueba son altamente costosas y la universidad no cuenta con ellas, igualmente el laboratorio de crudos no cuenta con el espacio y tiempo disponible para su realización, por estas razones mencionadas encontramos que no es viable la determinación de TPHs, por el método de extracción de grasas y aceites SOXHLET.

4.3.2 Método Gravimétrico Modificado (Extracción con solvente).

El método SOXHLET, anteriormente mencionado, ha sido uno de los métodos más empleado para la determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en la muestra de suelo contaminado; ya que éste presenta valores confiables y está estandarizado como un procedimiento sumamente efectivo; sin embargo, requiere de un tiempo elevado para su desarrollo y el número de muestras que se logran procesar es limitada, puesto que solo se puede realizar una muestra por columna destiladora. Por esto, se han desarrollado otras técnicas que tienen como finalidad optimizar el tiempo de realización de cada prueba y el tipo de solvente a utilizar, haciéndolas más económicas y rápidas, con el fin de poder llevar a cabo más muestras en menor tiempo y de manera eficaz.

El segundo método empleado para la determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en la muestra de suelo contaminado, se tuvo en cuenta el mismo principio que emplea el equipo de extracción SOXHLET, que consiste en emplear un solvente de carácter orgánico para extraer todos las grasas y aceites presentes en suelo; sin embargo, se optó por separar las diferentes fases (sólida/líquida) de la muestra de forma física, esperando que esta se estabilice, y la fase sólida (suelo) precipite para su extracción; Para la fase líquida se busca

eliminar el agua, obteniendo de esta manera un conjunto de solvente con el hidrocarburo (aceites y grasas) contenido en él, y por diferencia de pesos y volúmenes establecer la cantidad de solvente y la cantidad de TPH presentes.

Bajo la teoría anteriormente expuesta se realizó una modificación y adecuación del Método gravimétrico empleado para determinar Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH's) que se encuentra estandarizado según la norma (US EPA 821-B94-004,1995), las modificaciones se realizaron acorde a las necesidades y características del suelo que se analizó. A continuación, se indica como quedó el método según las modificaciones realizadas teniendo en cuenta los productos con los que se contaba y el propósito con el cual se requería la realización de las pruebas:

PROCESO Y RESULTADOS DEL ENSAYO DEL “METODO GRAVIMÉTRICO MODIFICADO”

Materiales y Equipos:

- Montaje de calentamiento de tipo “Baño de María”
- Embudo y/o botella de decantación para separación de fases
- Balanza de precisión
- Cámara de extracción de gases y vapores orgánicos
- Manta de calentamiento/estufa
- Termómetro
- Muselina o tela de filtrado
- Capsulas de vidrio
- Probetas de diferentes volúmenes
- Beakers de diferentes volúmenes
- Elemento o herramienta para agitación.

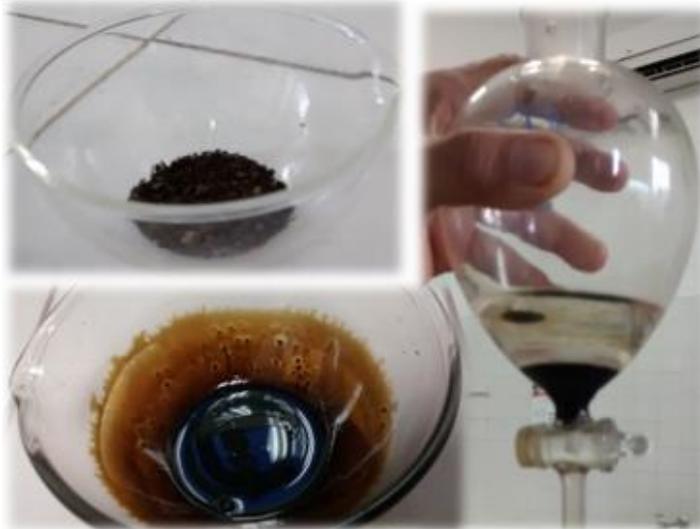
Elementos y Reactivos:

- Muestra de suelo contaminado
- Cloroformo
- Agua destilada

Procedimiento:

- Se agrega 1 gramo de suelo contaminado a una capsula de porcelana y pesa en una balanza de precisión.
- Se diluye el gramo de suelo en 100ml de agua a 40°C aproximadamente, agitando constantemente hasta obtener la dilución completa del suelo en el agua.
- A la mezcla de agua y suelo se le agrega el cloroformo de forma gradual, es decir, se comienza agregando 10 ml de cloroformo y agitando, si aún no se desprenden los hidrocarburos del suelo se agregan otros 10 ml de cloroformo hasta encontrar la concentración óptima. (de 20 de cloroformo aproximadamente en total).
- Se vierte la fase líquida de la mezcla en el embudo de decantación mientras se observa la separación de la fase aceitosa y la fase acuosa. El residuo sólido se separa para su posterior proceso de filtrado.
- Teniendo la mezcla en el embudo de decantación y después de agitar vigorosamente se extrae la fase aceitosa en un beaker y se elimina el residuo de la fase acuosa.
- Se realiza un montaje para realizar el proceso de filtración empleando una tela ideal que puede ser (franela/muselina/algodón), esta se dispone sobre un beaker sujetándola con una liga o cuerda y se procede a pasar el residuo sólido junto con el residuo líquido (fase aceitosa) obtenido en el procedimiento anterior, dejándola pasar por completo y de forma natural sin acelerar el proceso; Mientras el suelo se está filtrando se le agregan de 5 a 10 ml de cloroformo con el fin de lavar por completo el suelo filtrado y extraer hasta la última gota de hidrocarburo presente en él.
- Se desecha el suelo ya limpio que queda sobre la tela de filtrado y se observa una iridiscencia presente en la fase acuosa obtenida del filtrado, por lo que es necesario volver a decantar en el embudo y agregar agua destilada hasta lavar la solución y lograr que se establezcan las fases (aceitosa/acuosa). Por último, se extrae la fase aceitosa del embudo de decantación y se almacena en una capsula de vidrio o porcelana.
- Se coloca la solución aceitosa que se encuentra en la capsula de vidrio en el conjunto de baño de maría para eliminar (evaporar) el cloroformo aun presente y separar por completo el hidrocarburo contenido.
- Conociendo los pesos y volúmenes empleados de solvente y el volumen final de la mezcla se puede determinar la cantidad de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) presentes en el suelo.

Ilustración 24. Prueba piloto método gravimétrico modificado



(Autores)

Se realizó la prueba piloto para evaluar la efectividad de este procedimiento el día 04 de octubre de 2016, en el laboratorio de calidad de aguas donde se llevó a cabo cada una de las etapas que conforman el procedimiento teniendo los siguientes resultados.

Tabla 16. Condiciones iniciales prueba piloto método gravimétrico modificado.

Elemento	Cantidad
Muestra de suelo contaminado	1 g
Agua Destilada total	150 ml
Cloroformo	30 ml

(Autores)

Balance Estequiométrico:

Para determinar la cantidad de hidrocarburos que hay en la muestra de suelo que se empleó, fue necesario realizar una conversión de las cantidades iniciales con las que se realizó la mezcla contaminada, Es decir, la relación (Suelo - Hidrocarburo).

Si en 484.73 g de suelo → Hay 125 ml de hcs → que pesan 124.84 g

En 1 g de suelo → Hay **0.25787 g** de Hcs

Después de realizar el procedimiento de agitación, mezcla, decantación, filtrado y posterior evaporación descrito en el acápite anterior, se obtuvo una película aceitosa que corresponde a los hidrocarburos presentes en el gramo de suelo que se analizó.

Tabla 17. Datos obtenidos prueba piloto método gravimétrico modificado.

Elemento	Peso
Capsula vacía	26.2547 gr
Capsula Con Película de HyCs Final	26.4528 gr

(Autores)

Por lo tanto, el contenido de hidrocarburos extraído de la muestra fue de:

$$26.3566 \text{ g} - 26.2547 \text{ g} = 0.1954 \text{ g de Hcs}$$

Tabla 18. Comparación datos obtenidos en prueba piloto método gravimétrico modificado.

Elemento	Peso
Hidrocarburos teóricos presentes	0.2578 gr
Hidrocarburos reales presentes	0.1954 gr

(Autores)

CONCLUSIONES DEL ENSAYO DEL “METODO GRAVIMÉTRICO MODIFICADO”

- La realización del método gravimétrico modificado para la obtención de aceite y grasas de suelos contaminados procedente de la modificación del método gravimétrico arrojó como resultados un valor realmente aproximado al esperado

(real), como se observa en la tabulación anterior, dando un parte de confiabilidad mejor de lo esperado.

- Los materiales y reactivos empleados fueron suministrados del stock del laboratorio de química de la Universidad Surcolombiana, y por ende su adquisición fue más simple.
- Ya que cada prueba se puede llevar a cabo alrededor de 1 a 2 horas aproximadamente y de forma simultánea, se facilita la realización de las 40 muestras que se requieren analizar.
- Por lo anteriormente mencionado se decretó emplear este método experimental para la obtención de los hidrocarburos totales de petróleo (TPHs) presentes en las muestras de suelo contaminado a estudiar.

4.5 ETAPA 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo la evaluación de la variación de los niveles de TPH en suelos, se desarrolló el siguiente diseño experimental propuesto a diferentes intervalos de tiempos, que se consideraron eran precisos para obtener los resultados esperados; Se determinó que era importante realizar el estudio a tiempo 0, ya que este valor arrojaría un precedente con el cual fuera posible comparar los resultados a diferentes tiempos respecto al inicial; se escogieron los tiempos a 5, 18, 25 días respecto a un mes de trabajo, con el fin de poder realizar un análisis completo, es decir, encontrar un valor cercano al inicial, otro intermedio que corresponde al día 18 y otro final casi cerrando el mes de prueba que corresponde al día 25; Respecto a la concentración de hidrocarburos. empleados para contaminar el suelo muestreado, se optó por utilizar un diseño correspondiente al 3% que corresponde al valor máximo permitido de TPH's en suelos contaminados (Louisiana 29B), con el fin de tener como punto de referencia inicial el valor permitido en la actualidad; de igual modo se diseñaron otras dos concentraciones una al 5% que sería el valor de referencia intermedio y otra al 10% que determina el valor final y máximo de contaminación empleado en la realización del proyecto, tal y como se explica en el diagrama a continuación:

Tabla 19. Datos a recolectar durante el desarrollo del diseño experimental.

% Hycs	Suelo – Abono															
	1 – 1				1 – 2				1 - 0.5				1 - 0.25			
	t=0	t=5	t=18	t=25	t=0	t=5	t=18	t=25	t=0	t=5	t=18	t=25	t=0	t=5	t=18	t=25
3%																
5%																
10%																

El lugar escogido para realizar el tratamiento de Biorremediación fue las instalaciones del laboratorio de lodos de la Universidad Surcolombiana, en donde el día miércoles 2 de noviembre de 2016 se dispuso a realizar el montaje de 12 eras (muestras) en compartimientos (Ilustración 25) con dimensiones de 20 cms de ancho, 30 cms de largo y 5 cms de profundidad como se puede observar en la ilustración 23, a los cuales previamente se les realizó aberturas con el fin de que si había generación de lixiviados se pudiera recolectar para reinyectar nuevamente en cada era respectivamente.

Las Eras elaboradas tuvieron como único factor común la cantidad de suelo empleado, teniendo en cuenta que las cantidades de hidrocarburo y de abono a las que fueron expuestas para cada una fueron diferentes. Durante el desarrollo la investigación las eras estuvieron exhibidas a una temperatura controlada y constante de aproximadamente 24 °C.

Ilustración 25. Recipiente empleado para el montaje de las eras.



(Autores)

Para dar ejecución al diseño experimental propuesto, el día jueves 3 de noviembre se dispuso a realizar la correspondiente contaminación y aplicación del agente bioremediador (abono) a cada una de las eras previamente organizadas, denominadas de la siguiente manera:

Tabla 20. Denominación de las eras acuerdo a su carga contaminante y de abono.

Carga Contaminante	Suelo – Abono			
	1 – 1	1 – 2	1 - 0.5	1 - 0.25
3%	E1	E2	E3	E4
5%	E5	E6	E7	E8
10%	E9	E10	E11	E12

Con base en la tabla 16, se tiene que cada era tiene la siguiente composición:

- Era 1: S + HyC₁ + A₁
Era 1: 700 gramos de suelo + 21 gramos Hyc + 700 gramos de abono.
- Era 2: S + HyC₁ + A₂
Era 2: 700 gramos de suelo + 21 gramos HyC + 1400 gramos de abono.
- Era 3: S + HyC₁ + A₃
Era 3: 700 gramos de suelo + 21 gramos HyC + 350 gramos de abono.
- Era 4: S + HyC₁ + A₄
Era 4: 700 gramos de suelo + 21 gramos HyC + 175 gramos de abono.
- Era 5: S + HyC₂ + A₁
Era 5: 700 gramos de suelo + 35 gramos Hyc + 700 gramos de abono.
- Era 6: S + HyC₂ + A₂
Era 6: 700 gramos de suelo + 35 gramos HyC + 1400 gramos de abono.
- Era 7: S + HyC₂ + A₃
Era 7: 700 gramos de suelo + 35 gramos HyC + 350 gramos de abono.
- Era 8: S + HyC₂ + A₄
Era 8: 700 gramos de suelo + 35 gramos HyC + 175 gramos de abono.
- Era 9: S + HyC₃ + A₁
Era 5: 700 gramos de suelo + 70 gramos Hyc + 700 gramos de abono
- Era 10: S + HyC₃ + A₂
Era 10: 700 gramos de suelo + 70 gramos HyC + 1400 gramos de abono.
- Era 11: S + HyC₃ + A₃
Era 11: 700 gramos de suelo + 70 gramos HyC + 350 gramos de abono.
- Era 12: S + HyC₃ + A₄
Era 4: 700 gramos de suelo + 70 gramos HyC + 175 gramos de abono.

Teniendo en cuenta que las cantidades de hidrocarburo están dadas en gramos y que previamente ya se conoce la densidad del mismo (Tabla 12), se realizan los siguientes cálculos con el propósito de pasarlos a ml:

$$\rho (\text{Densidad}) = \left(\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right)$$

- Para una carga contaminante de 3%, la masa es de 21 gramos

$$\rho = \left(\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right) = \left(\frac{21 \text{ gramos}}{0,9285 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} \right) = 22,617 \text{ ml}$$

- Para una carga contaminante de 5%, la masa es de 35 gramos

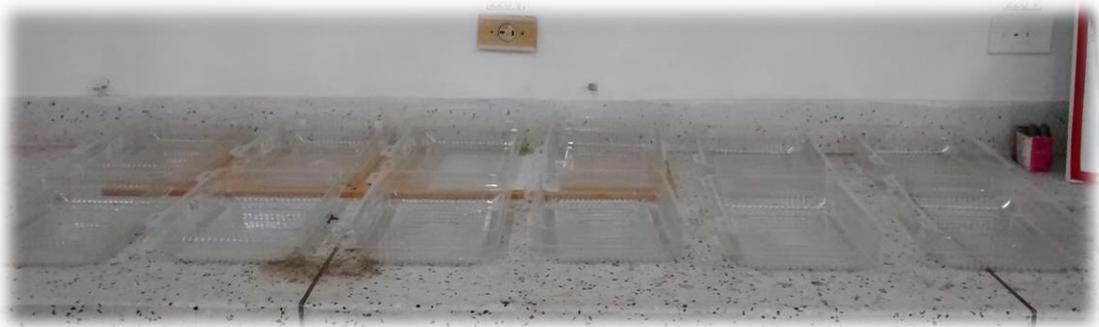
$$\rho = \left(\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right) = \left(\frac{35 \text{ gramos}}{0,9285 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} \right) = 37,695 \text{ ml}$$

- Para una carga contaminante de 10%, la masa es de 70 gramos

$$\rho = \left(\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right) = \left(\frac{70 \text{ gramos}}{0,9285 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}} \right) = 75,390 \text{ ml}$$

Para realizar la contaminación fue necesario el uso de jeringas de 50 cm³, 20 cm³ y 10 cm³, con el propósito de que las cantidades fueran lo más exactas posibles. Además, se estableció un periodo de volteo diario durante 2 minutos.

Ilustración 26. Compartimientos para elaboración de eras.



(Autores)

Ilustración 27. Suelo y abono respectivamente.



(Autores)

Ilustración 28. Jeringas empleadas en la contaminación.



(Autores)

Ilustración 29. Eras contaminadas.



(Autores)

5. BIORREMEDIACIÓN DEL SUELO

Después de realizar las pruebas pilotos (Etapa 2) tanto por el método Soxhlet como por el método gravimétrico modificado por extracción, se concluyó que el método ideal elegido para realizar las pruebas para medir los valores de TPH fue el gravimétrico de extracción por solvente mediante el uso de embudo de separación, por lo cual se dispuso a realizar 3 series de pruebas cada una de 12 muestras, distribuidas como se puede observar en la Tabla

Tabla 21. Cronograma pruebas.

Serie	Días después de contaminar	Fecha
Serie 1	5	8 de Noviembre
Serie 2	18	21 de Noviembre
Serie 3	25	28 de Noviembre

(Autores)

El procedimiento que se realizó a los 5, 18 y 25 días, fue el siguiente:

Para llevar a cabo las pruebas para cada una de las series que a su vez se componen de 12 muestras, se realizó el mismo procedimiento con cada una de forma cuidadosa y lo más precisas posibles para así evitar que el margen de error aumentara.

Momento 1. Para cada prueba se requirió la cantidad de 1 gramo de suelo contaminado y expuesto al tratamiento con abono (Ilustración 30),

Ilustración 30. Desarrollo de pruebas, Momento 1.



(Autores)

Momento 2. El gramo de suelo se mezcló con agua destilada a una temperatura de 80 °C con el fin de disgregar todas las partículas facilitando el proceso. Después de agitar durante alrededor de 5 minutos, se agregó 10 mL de cloroformo, se mezcló por 5 minutos, se agregó otros 10 mL y de nuevo se mezcló por 5 minutos con el fin de separar la grasa y aceite presente en el suelo de cada una de las muestras (Ilustración 31)

Ilustración 31. Desarrollo de pruebas, Momento 2.



(Autores)

Momento 3. Posteriormente se procedió a decantar la fase más liviana, el residuo se expuso a un proceso de filtración mediante el uso de muselina como tela filtrante, la cual permitió dejar pasar la grasa mezclada con el cloroformo y retener el suelo presente en la mezcla, después de realizar la filtración por tres veces con el fin de garantizar la mínima presencia de suelo en la grasa, se procedió a decantar de nuevo ya obteniendo solo la grasa incorporada en el cloroformo.

Ilustración 32. Desarrollo de pruebas, Momento 3.



(Autores)

Momento 4. Después de esto se procedió a realizar la evaporación mediante el baño maría en los laboratorios de química de la Universidad Surcolombiana a una temperatura controlada de 80 °C, logrando así obtener la cantidad solamente de hidrocarburos y grasas presentes en cada una de las muestras (Ilustración 32).

Ilustración 33. Desarrollo de pruebas, Momento 4.



(Autores)

5.1 BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO

Teniendo en cuenta la composición con la que se diseñaron cada una de las Eras y las cantidades específicas de suelo, hidrocarburo y abono que fueron empleadas, fue necesario realizar un balance estequiométrico donde se relacionara la cantidad de hidrocarburo presente en el suelo de la muestra (Era) completa, es decir, el hidrocarburo total que fue adicionado, junto con el hidrocarburo que debe estar presente en 1 gramo, es decir, el esperado al realizar la prueba de extracción de grasa y aceites; Esto se llevó a cabo de la manera que se expresa a continuación:

Tabla 22. Composición Era 1.

ERA # 1			
Componente	Composición de la mezcla	Composición en 1 g	Porcentaje en 1 gr en dilución
g. de Hycs	21 g	0.0148 g	1.48 %
g. de abono	700 g	0.4926 g	49.26 %
g. de suelo	700 g	0.4926 g	49.26 %
Total	1421 g	1 g	100 %

(Autores)

Muestra de cálculos: realizados para la Era #1

*Si en 1421 g de mezcla → hay 21 g de Hcs.
en 1 g de muestra → hay **0.0148 g** de Hcs.*

*Si en 1421 g de mezcla → hay 700 g de suelo.
en 1 g de muestra → hay **0.4926 g** de suelo.*

*Si en 1421 g de mezcla → hay 700 g de abono.
en 1 g de muestra → hay **0.4926 g** de abono.*

Muestra de cálculos: realizados para la Era #2

*Si en 2121 g de mezcla → hay 21 g de Hcs.
en 1 g de muestra → hay **0.0099 g** de Hcs.*

*Si en 2121 g de mezcla → hay 700 g de suelo.
en 1 g de muestra → hay **0.33 g** de suelo.*

*Si en 2121 g de mezcla → hay 1400 g de abono.
en 1 g de muestra → hay **0.66 g** de abono.*

6. RESULTADOS

6.1 CARACTERIZACIÓN DEL HIDROCARBURO

Con el fin de dar desarrollo al proyecto investigativo, fue necesario conocer algunas propiedades del hidrocarburo empleado, como lo fue la densidad y su gravedad API, es por esto que se procede a emplear el método del Picnómetro de BRNGHAM. El procedimiento de manera general, consiste en llenar el picnómetro con la muestra y pesarlo, se registra la temperatura del laboratorio para luego reportarla a dicha temperatura. La densidad se calcula con la diferencia entre el peso del picnómetro lleno de crudo menos la masa de éste vacío y se divide en el volumen del picnómetro.

Peso Picnómetro solo = 36,28 gr

Volumen del Picnómetro = 49,99 ml

Peso Picnómetro con crudo = 82,7 gr

$$\text{Masa del crudo} = \text{Peso Pc} - \text{Peso Ps}$$

$$\text{Masa del crudo} = 82,7 \text{ gr} - 36,28 \text{ gr} = 46,42 \text{ gr}$$

$$\rho_{\text{crudo}} = \frac{\text{Masa del crudo}}{\text{Volumen Picnómetro}}$$

$$\rho_{\text{crudo}} = \frac{46,42 \text{ gr}}{49,99 \text{ ml}} = 0,9285 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}$$

Conociendo la densidad, se puede calcular la gravedad API de la siguiente forma:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\rho_{\text{crudo}}} - 131.5$$

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{0,9285} - 131.5 = ^{\circ}\text{API} = 20,89$$

6.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL SUELO

Los siguientes resultados fueron producto del análisis realizado por parte del Laboratorio de Suelos y del Laboratorio de Construcción especializado en análisis físico y químicos ubicados en las instalaciones de la Universidad Surcolombiana, con el fin de determinar las propiedades innatas del suelo, el cual se empleó para realizar las pruebas cuyo propósito inicial fue la determinación de la variación de los niveles de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en las muestras previamente impregnadas con hidrocarburo y a su vez poder determinar si el abono favorece la biorremediación de los contaminantes grasos que lo componen. Los datos obtenidos se pueden observar en las Tablas 21 y 22.

Tabla 23. Reporte Propiedades Químicas del suelo.

Parámetro	Resultado
pH	6,6 (Neutro)
Conductividad	366 us/cm

(Autores)

Tabla 24. Reporte Propiedades Físicas del suelo.

Parámetro	Resultado
Clasificación Textural (Mét. Bouyoucos)	Suelo Arenoso (Arena: 89%; Arcilla: 4%; Limos: 7%)
Color	Brown (2.5 value y 5/4 chromo)
Densidad Aparente	2,28 gr/cm ³
Densidad Real	1,61 gr/cm ³
Porosidad	29,4
Humedad	6,15%

(Autores)

6.3 CÁLCULOS DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH) EN CADA SERIE DE EXPERIENCIAS

Con el propósito de desarrollo a los análisis necesarios para el cálculo de porcentajes de TPH en las tres etapas que conforman el diseño experimental, fue necesario el conocer el porcentaje inicial que presentaba cada una de las muestras una vez se haya hecho la dilución del suelo contaminado con hidrocarburo mediante la adición del tratamiento con abono propuesto (Ver muestra de cálculo Tabla 21). Los valores iniciales que presentan cada una de las muestras, se muestran a continuación:

Tabla 25. Reporte de valores iniciales de %TPH en dilución con tratamiento de abono.

Era	Suelo (gr)	Hycs (gr)	Abono (gr)	%TPH sin tratamiento (mz)	%TPH de Dilución en 1 gr
1	700	21	700	3	1,48
2	700	21	1400	3	1
3	700	21	350	3	1,95
4	700	21	175	3	2,34
5	700	35	700	5	2,44
6	700	35	1400	5	1,64
7	700	35	350	5	3,22
8	700	35	175	5	3,85
9	700	70	700	10	4,76
10	700	70	1400	10	3,22
11	700	70	350	10	6,25
12	700	70	175	10	9,45

(Autores)

6.3.1 Serie 1.

La primera serie de muestras fue tomada de las 12 eras elaboradas anteriormente, que como se mencionó, cada una presenta una combinación distinta (CANTIDAD) de crudo y se biorremediaron también con cantidades distintas de abono.

El día 8 de noviembre de 2016 se realizó la primera serie de pruebas correspondientes al día número 5 del proceso de biorremediación, estas se realizaron en el laboratorio de aguas de la Universidad Surcolombiana, donde fueron seleccionadas de forma aleatoria 12 pequeñas muestras de cada Era de aproximadamente 1 gramo para el desarrollo del procedimiento, siguiendo el paso a paso de forma meticulosa y obteniendo como resultado lo tabulado a continuación.

Tabla 26. Reporte de datos obtenidos en la Serie 1.

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=5 (%)
M1	0,03	3	1,48	50,7768	50,7912	0,0144	1,44
M 2	0,03	3	1	50,8314	50,8394	0,009	0,9
M 3	0,03	3	1,95	50,9947	51,0139	0,0192	1,92
M 4	0,03	3	2,34	50,9541	50,9774	0,0233	2,33
M 5	0,05	5	2,44	50,5678	50,5919	0,0241	2,41
M 6	0,05	5	1,64	50,4522	50,4679	0,0157	1,57
M 7	0,05	5	3,22	50,9825	51,0145	0,032	3,2
M 8	0,05	5	3,85	50,8592	50,8977	0,0385	3,85
M 9	0,1	10	4,76	50,8410	50,8875	0,0465	4,65
M 10	0,1	10	3,22	50,4326	53,5326	0,031	3,1
M 11	0,1	10	6,25	50,9257	50,9872	0,0615	6,15
M 12	0,1	10	9,45	50,4914	50,5849	0,0935	9,35

(Autores)

6.3.2 Serie 2.

La segunda serie de muestras fue tomada bajo las mismas condiciones de la primera serie, con la diferencia que esta se realizó el día 21 de noviembre que correspondió al día número 18 del proceso de biorremediación, las pruebas de igual forma se realizaron en el laboratorio de aguas de la Universidad Surcolombiana, a una temperatura de 24°C, seleccionando 12 pequeñas muestras (nuevas) de aproximadamente 1 gramo para la realización del procedimiento. A continuación, los resultados obtenidos.

Tabla 27. Reporte de datos obtenidos en la Serie 2.

Muestra	Hycs. Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs finales (gr)	TPH t=18 (%)
M 1	0,03	3	1,48	50,4423	50,4541	0,0118	1,18
M 2	0,03	3	1	50,7993	50,8060	0,0067	0,67
M 3	0,03	3	1,95	50,4134	50,4306	0,0172	1,72
M 4	0,03	3	2,34	50,8729	50,8946	0,0217	2,17
M 5	0,05	5	2,44	50,8875	50,9078	0,0203	2,03
M 6	0,05	5	1,64	50,3992	50,4110	0,0118	1,18
M 7	0,05	5	3,22	50,8969	50,9269	0,03	3
M 8	0,05	5	3,85	50,4336	50,4700	0,0364	3,64
M 9	0,1	10	4,76	50,7326	50,7744	0,0418	4,18
M 10	0,1	10	3,22	50,8387	50,8624	0,0237	2,37
M 11	0,1	10	6,25	50,4887	50,5454	0,0567	5,67
M 12	0,1	10	9,45	50,9319	51,0206	0,0887	8,87

(Autores)

6.3.3 Serie 3.

Para la tercera serie de muestras se emplearon 12 nuevas muestras previamente seleccionadas de 1 gramo aproximadamente cada una, bajo las mismas condiciones de la primera y segunda serie. Esta se llevó a cabo el día 28 de noviembre que representó el día número 25 del proceso de biorremediación, las pruebas de igual forma se realizaron en el laboratorio de aguas de la Universidad Surcolombiana, a una temperatura de 24°C, en la siguiente tabla se encuentran registrados los resultados obtenidos.

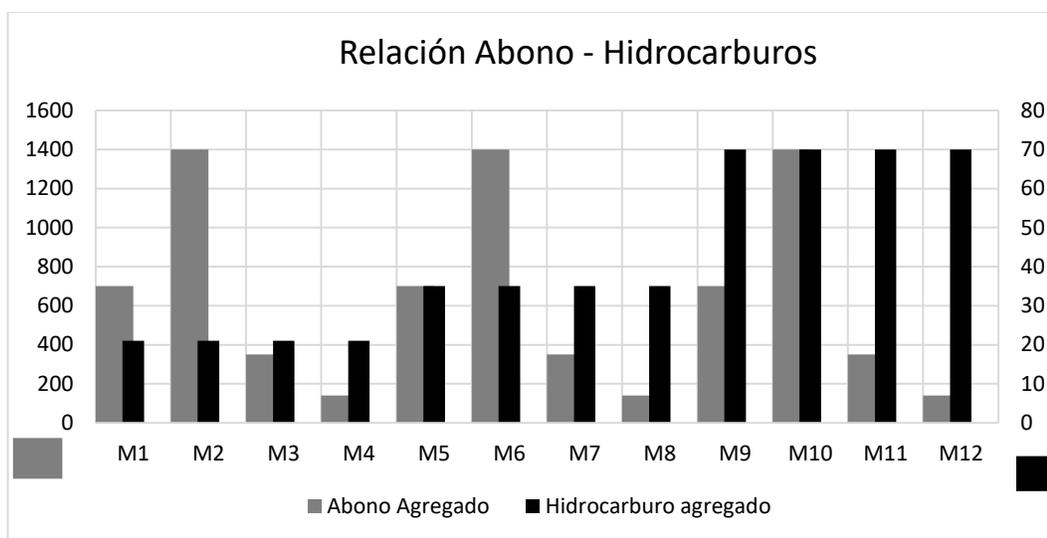
Tabla 28. Reporte de datos obtenidos en la Serie 3.

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=25 (%)
M 1	0,03	3	1,48	50,8234	50,8338	0,0104	1,04
M 2	0,03	3	1	50,9174	50,9219	0,0045	0,45

M 3	0,03	3	1,95	50,8795	50,8957	0,0162	1,62
M 4	0,03	3	2,34	50,4320	50,4521	0,0201	2,01
M 5	0,05	5	2,44	50,8663	50,8863	0,02	2
M 6	0,05	5	1,64	50,4740	50,4840	0,01	1
M 7	0,05	5	3,22	50,3863	50,4149	0,0286	2,86
M 8	0,05	5	3,85	50,8605	50,8957	0,0352	3,52
M 9	0,1	10	4,76	50,7872	50,8281	0,0409	4,09
M 10	0,1	10	3,22	50,3980	50,4209	0,0229	2,29
M 11	0,1	10	6,25	50,4232	50,4794	0,0562	5,62
M 12	0,1	10	9,45	50,7227	50,8110	0,0883	8,83

(Autores)

Gráfica 1. Relación Abono - Hidrocarburos.



(Autores)

6.4 ESTUDIO ADICIONAL

Debido a que muchos compuestos presentan un proceso difícil de degradación por sus características químicas, por lo que se hace necesario que el proceso de biorremediación sea efectuado a un tiempo indefinido, es decir, que su duración sea prolongada, en el caso de los hidrocarburos este puede extenderse por meses e incluso años.

Ya que el diseño experimental empleado anteriormente se planteó para ser evaluado a los 0, 5, 18 y 25 días, y teniendo en cuenta que este tiempo es corto comparado con el tiempo necesario para la interacción de las bacterias con el contaminante, se planteó una cuarta serie de pruebas con las mismas 12 eras utilizadas en el proyecto a los 90 días, después de expuestas al tratamiento.

El día martes 1 de febrero del presente año, se llevó a cabo la última serie de pruebas para la determinación de TPH's bajo la aplicación del método gravimétrico modificado, siguiendo el mismo procedimiento y condiciones con las que se realizaron todas las pruebas anteriormente mencionadas. A continuación, en la Tabla 28 se evidencian los resultados obtenidos del análisis a los 90 días:

Tabla 29. Reporte de datos obtenidos en la Serie 4 (90 días).

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=90 (%)
M1	0,03	3	1,48	50,3981	50,4024	0,0043	0,43
M 2	0,03	3	1	50,8794	50,8794	no registra	no registra
M 3	0,03	3	1,95	50,3864	50,3932	0,0068	0,68
M 4	0,03	3	2,34	50,8665	50,8817	0,0152	1,52
M 5	0,05	5	2,44	50,7230	50,7292	0,0062	0,62
M 6	0,05	5	1,64	50,8233	50,8233	no registra	no registra
'M 7	0,05	5	3,22	50,8603	50,8841	0,0238	2,38
M 8	0,05	5	3,85	50,7870	50,8166	0,0296	2,96
M 9	0,1	10	4,76	50,9172	50,9397	0,0225	2,25
M 10	0,1	10	3,22	50,4234	50,4234	no registra	no registra
M 11	0,1	10	6,25	50,4742	50,5148	0,0406	4,06
M 12	0,1	10	9,45	50,4322	50,4989	0,0667	6,67

(Autores)

Culminada la etapa de realización de análisis de muestras, en la Tabla 29 se dispone de un resumen donde se puede observar cuantitativamente como fue el comportamiento que se evidenció a lo largo de todo el tratamiento dividido en 4 series (S1: Día 5; S2: Día 18; S3: Día 25 y S4: Día 90).

Tabla 30. Reporte de datos obtenidos durante el desarrollo de la investigación.

Era	Suelo (gr)	Hycs (gr)	Abono	%TPH sin tratamiento (mz)	%TPH de Dilución en 1 gr					% REMOCIÓN TPH			
					t=0	t=5	t=18	t=25	t=90	t=5	t=18	t=25	t=90
1	700	21	700	3	1,48	1,44	1,18	1,04	0,43	0,04	0,3	0,44	1,05
2	700	21	1400	3	1	0,9	0,67	0,45	N.R.	0,1	0,33	0,55	1
3	700	21	350	3	1,95	1,92	1,72	1,62	0,68	0,03	0,23	0,33	1,27
4	700	21	175	3	2,34	2,33	2,17	2,01	1,52	0,01	0,17	0,33	0,82
5	700	35	700	5	2,44	2,41	2,03	2	0,62	0,03	0,41	0,44	1,82
6	700	35	1400	5	1,64	1,57	1,18	1	N.R.	0,07	0,46	0,64	1,64
7	700	35	350	5	3,22	3,2	3	2,86	2,38	0,02	0,22	0,36	0,84
8	700	35	175	5	3,85	3,85	3,64	3,52	3,14	0	0,21	0,33	0,71
9	700	70	700	10	4,76	4,65	4,18	4,09	2,25	0,11	0,58	0,67	2,51
10	700	70	1400	10	3,22	3,1	2,37	2,29	N.R.	0,12	0,85	0,93	3,22
11	700	70	350	10	6,25	6,15	5,67	5,62	4,06	0,1	0,58	0,63	2,19
12	700	70	175	10	9,45	9,35	8,87	8,83	7,38	0,1	0,58	0,62	2,07

(Autores)

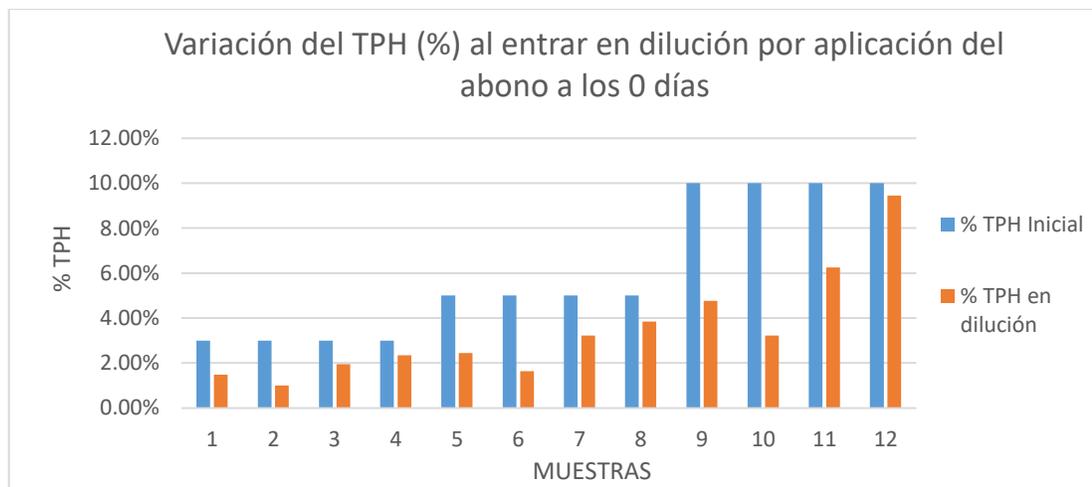
7. ANALISIS DE RESULTADOS

El emplear un abono 100% orgánico como posible agente bioremediador, partió de la idea de buscar métodos prácticos, de fácil uso, no nocivo contra la salud de las personas que tendrían contacto, rentable económicamente y lo más importante eficaz a la hora de usarse con el fin de disminuir los niveles de contaminación presente en muestras de suelo, evaluados mediante los niveles de TPH que presenten dichas muestras.

7.1 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.

En primer lugar, al momento de aplicar el tratamiento a base de abono orgánico a cada una de las eras teniendo en cuenta el diseño experimental previamente planteado, hubo una disminución inicial a 0 días en el %TPH debido a la dilución a la cual fue expuesta (Ver Gráfico 2.).

Gráfica 2. Variación del TPH (%) al entrar en dilución por aplicación del abono a los 0 días.



(Autores)

Al analizar los resultados de TPH obtenidos en cada una de las series de pruebas realizadas, se puede observar una reducción positiva en la cantidad de Hidrocarburos Totales de Petróleo que se encontraban en cada una de las Eras tratadas con abono con respecto a un tiempo 0 de expuestas al tratamiento, lo cual comprueba la eficacia que tiene el abono a la hora de ser aplicado sobre el

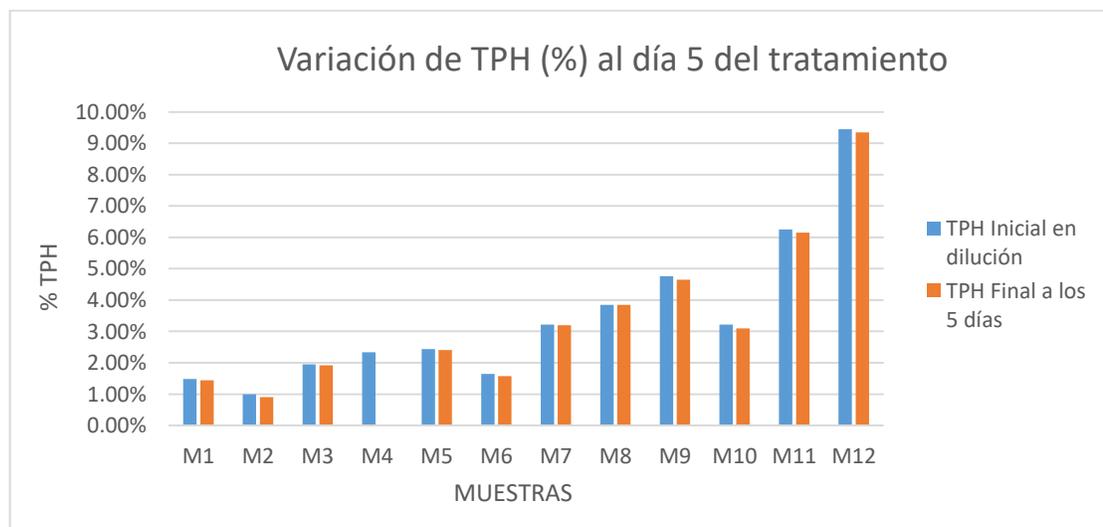
suelo, es decir, se demuestra que posee la capacidad de ser empleado como agente bioremediador.

La primera serie de análisis de la variación de los niveles de TPH se realizó a los 5 días después de exponer las 12 Eras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico 3.) se puede analizar que:

- Las Eras con relación 1-1 (M1, M5 y M9) mostraron disminución de los niveles de TPH (%) pero de una forma leve, con una remoción promedio de 0,06% de TPH.
- Las Eras con relación 1-2 (M2, M6 y M10) presentaron la mayor tasa de biorremediación, con un valor promedio de remoción de 0,09% de TPH.
- Las Eras con relación 1-0.5 (M3, M7 y M11) revelaron cambios menores a los mostrados por las eras con relación 1-1. En estas Eras hubo una remoción promedio de 0,05% de TPH.
- Las Eras con relación 1-0.25 (M4, M8 y M12), no hay presencia de cambios en el % de TPH, debido a que son las Eras con menor cantidad de abono, la remoción en los niveles de TPH fue de 0,036%.

En el lugar donde se encontraban las Eras ubicadas, a los 5 días después del tratamiento aún era perceptible al ambiente el olor a hidrocarburo que emanaban a temperatura ambiente.

Gráfica 3. Variación de TPH (%) al día 5 del tratamiento.



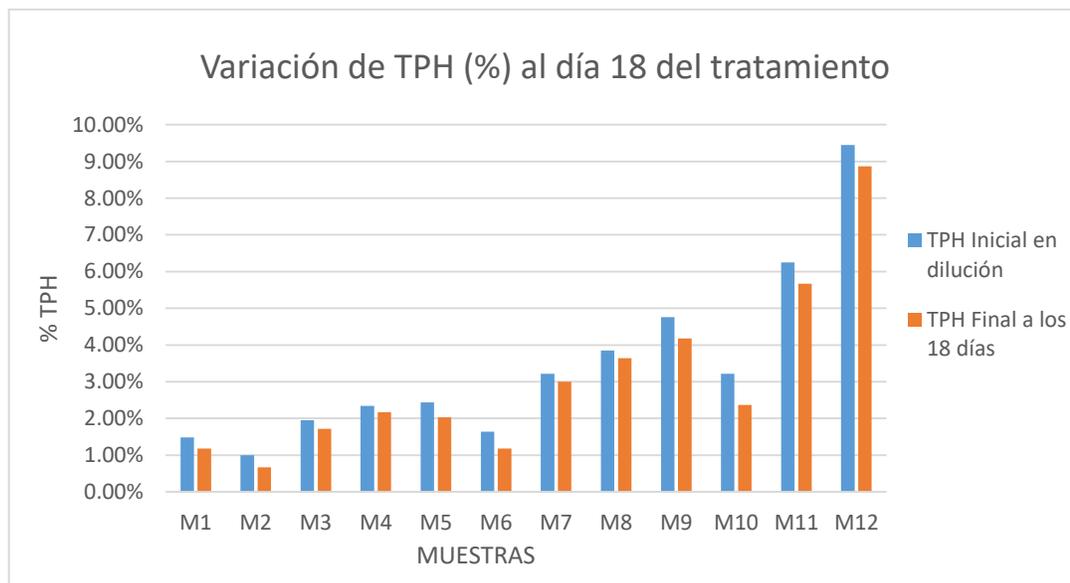
(Autores)

La segunda serie de análisis de variación de los niveles de TPH se realizó a los 18 días después de exponer las 12 Eras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico 4.) se puede analizar que:

- Las Eras con relación 1-1 (M1, M5 y M9) mejoró el porcentaje promedio de remoción, ya que pasó de 0,06 a 0,43 en los niveles de TPH.
- Las Eras con relación 1-2 (M2, M6 y M10) presentaron de nuevo la mayor tasa de biorremediación, afectando considerablemente el % de remoción de TPH en las tres muestras, pasando de 0,09% a 0,54% promedio.
- Las Eras con relación 1-0.5 (M3, M7 y M11), aunque pasaron de una remoción promedio de 0,05% a 0,34% en los niveles de TPH, se considera que no presenta una disminución notoria, a nivel de biorremediación.
- Las Eras con relación 1-0.25 (M4, M8 y M12), comienza a haber un leve aumento en cuanto a la remoción mostrada en los resultados de la serie 1, pasando de 0,03% promedio a un 0,32% en los valores de TPH.

En el lugar donde se encontraban las Eras ubicadas, a los 15 días después del tratamiento ya no era perceptible al ambiente el olor a hidrocarburo que antes emanaban a temperatura ambiente.

Gráfica 4. Variación de TPH (%) al día 18 del tratamiento.

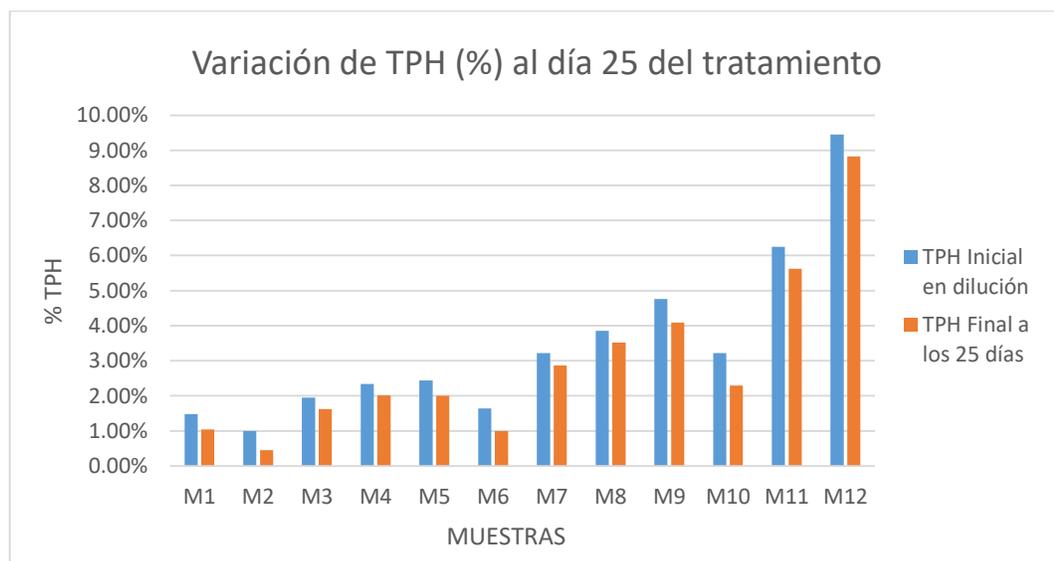


(Autores)

La tercera serie de análisis de la variación de los niveles de TPH se realizó a los 25 días después de exponer las 12 Eras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico 5.) se puede analizar que:

- Las Eras con relación 1-1 (M1, M5 y M9) continúan mostrando el segundo mejor comportamiento con respecto a la remoción en los niveles de TPH (%) en las tres muestras. Presentan a los 25 días un 0,516% de remoción con respecto al día 0.
- Las Eras con relación 1-2 (M2, M6 y M10) presentaron de nuevo la mayor tasa de biorremediación, disminuyendo notablemente un 0,71% de TPH al momento de realizar una comparación entre el tiempo de 0 días de tratamiento y los 25 días de expuestas las tres muestras.
- Las Eras con relación 1-0.5 (M3, M7 y M11), ya hubo resultados positivos en los niveles de TPH, evidenciando la eficacia del abono como agente bioremediador en las tres muestras a la interacción con abono, con una remoción promedio en estas tres muestras del 0,44% entre los 0 y los 25 días del tratamiento.
- Las Eras con relación 1-0.25 (M4, M8 y M12), presenta una disminución en las tres muestras en los valores de TPH mucho menor comparado con las Eras anteriormente analizadas. Hubo una baja promedio de remoción de 0,42% en los niveles de TPH.

Gráfica 5. Variación de TPH (%) al día 25 del tratamiento.

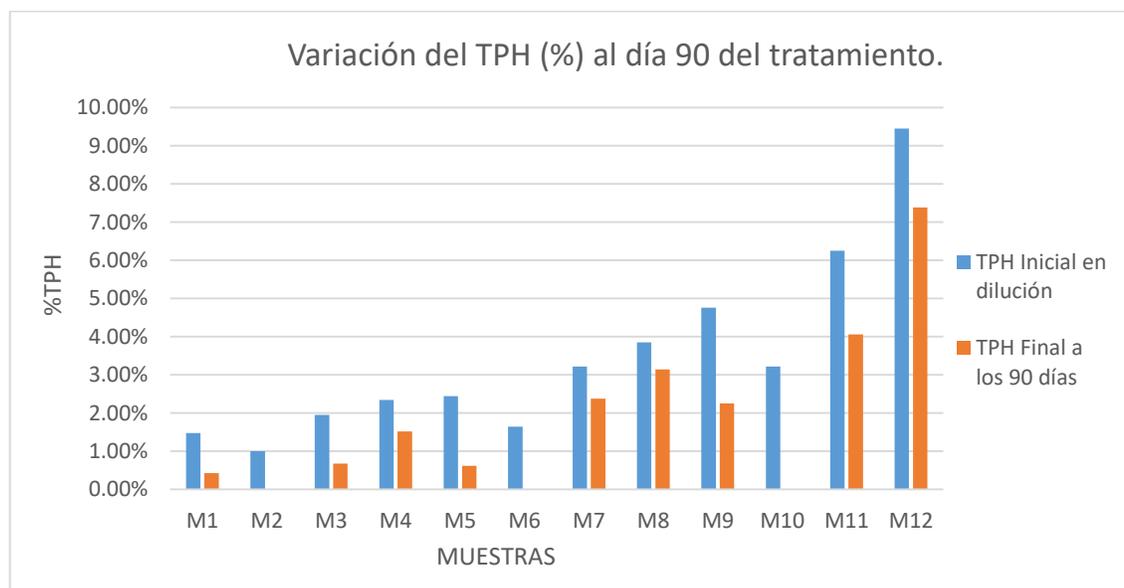


(Autores)

La cuarta serie de análisis de la variación de los niveles de TPH se realizó a los 90 días después de exponer las 12 Eras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico 6.) se puede analizar que:

- Las Eras con relación 1-1 (M1, M5 y M9) continúan mostrando el segundo mejor comportamiento con respecto a la remoción de TPH (%) en las tres muestras. A los 90 días presentan un 1,19% promedio de remoción con respecto al día 0.
- Las Eras con relación 1-2 (M2, M6 y M10) corroboraron ser la mejor relación en cuanto a evidenciar la mayor tasa de biorremediación, disminuyendo notablemente un 1,95% de TPH al momento de realizar una comparación entre el tiempo de 0 días de tratamiento y los 90 días de expuestas las tres muestras.
- Las Eras con relación 1-0.5 (M3, M7 y M11), ya hubo resultados positivos en los niveles de TPH, evidenciando la eficacia del abono como agente bioremediador en las tres muestras a la interacción con abono, con una remoción promedio en estas tres muestras del 1,43% entre los 0 y los 90 días del tratamiento.
- Las Eras con relación 1-0.25 (M4, M8 y M12), presenta una disminución en las tres muestras en los valores de TPH mucho menor comparado con las Eras anteriormente analizadas. Hubo una remoción promedio de 1,2% en los niveles de TPH.

Gráfica 6. Variación del TPH (%) al día 90 del tratamiento.

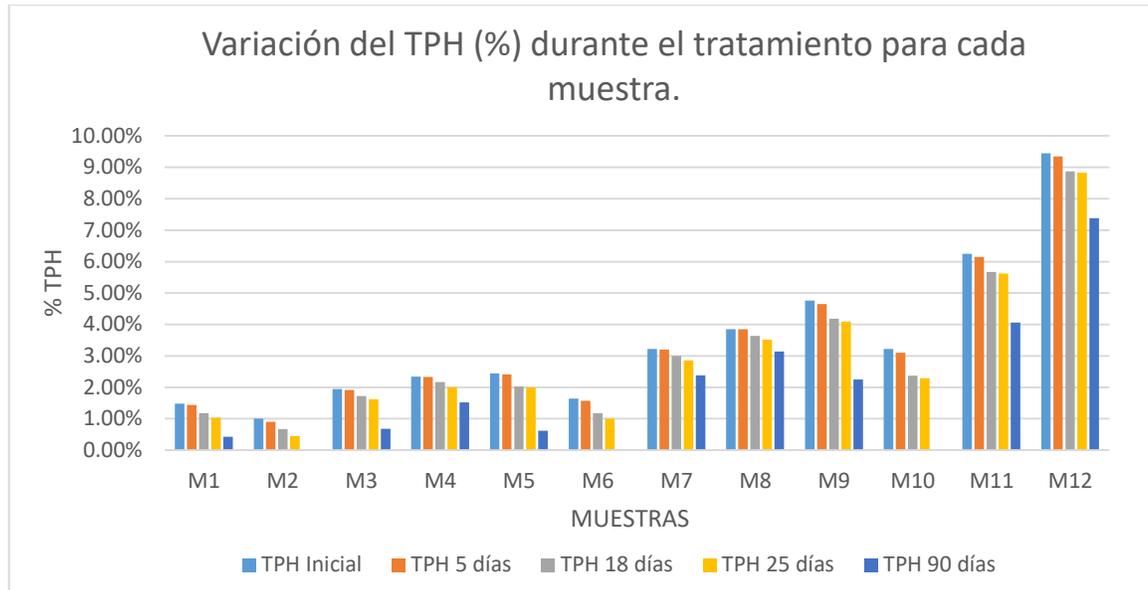


(Autores)

Analizando el comportamiento de cada una de las muestras a lo largo del desarrollo del tratamiento, se puede observar que la eficacia del abono aumenta a

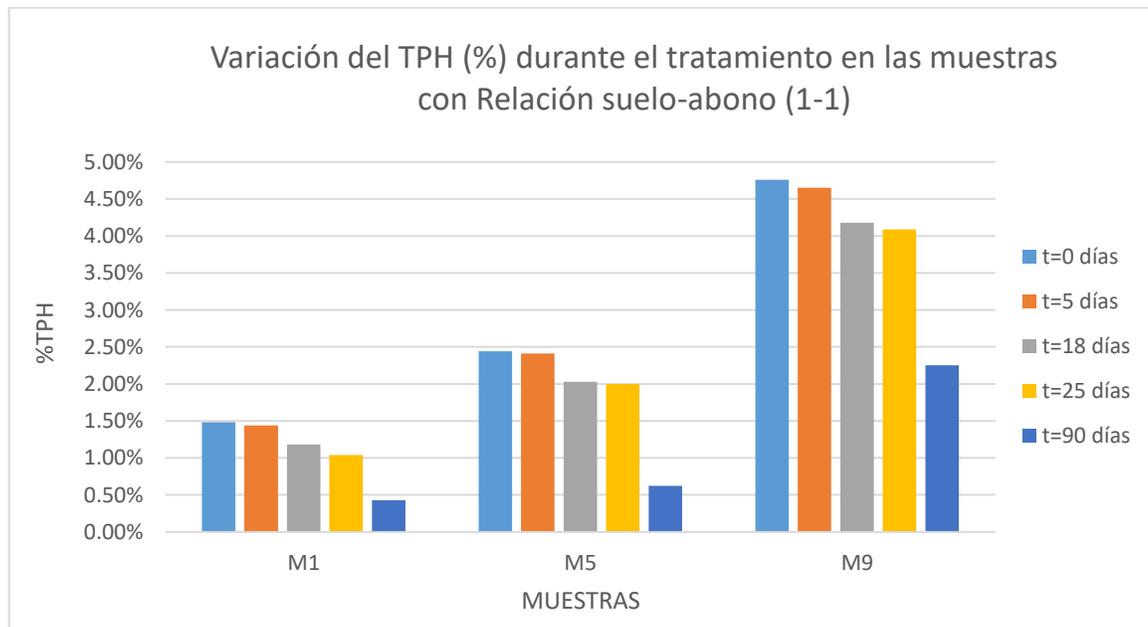
medida que es más alta su concentración y el tiempo al cual es expuesto el suelo, independientemente de la carga contaminante a la cual sea expuesta.

Gráfica 7. Variación del TPH (%) durante el tratamiento.



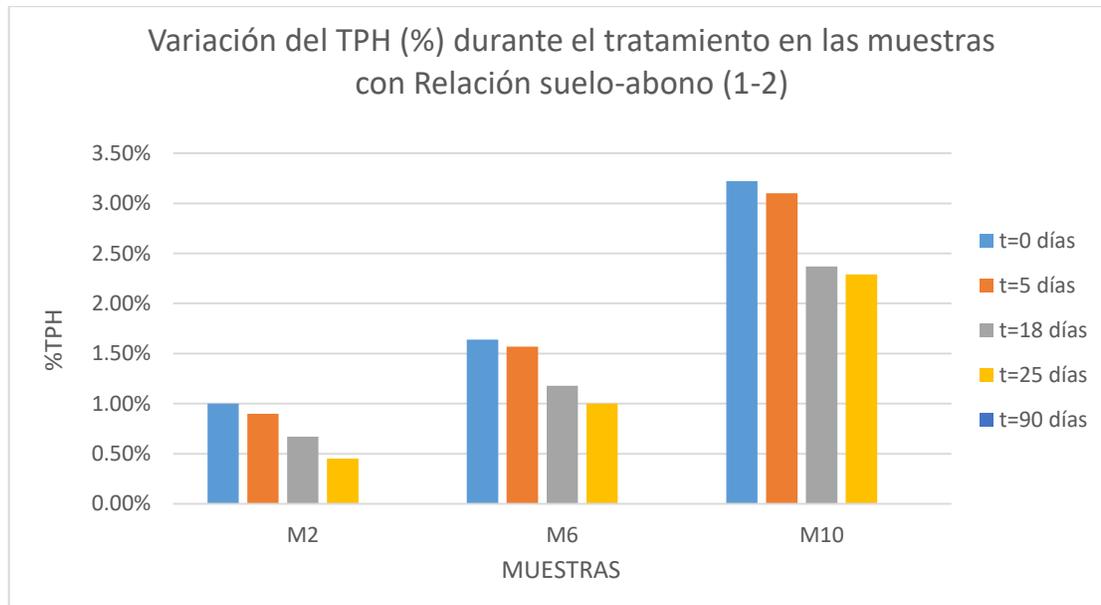
(Autores)

Gráfica 8. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-1).



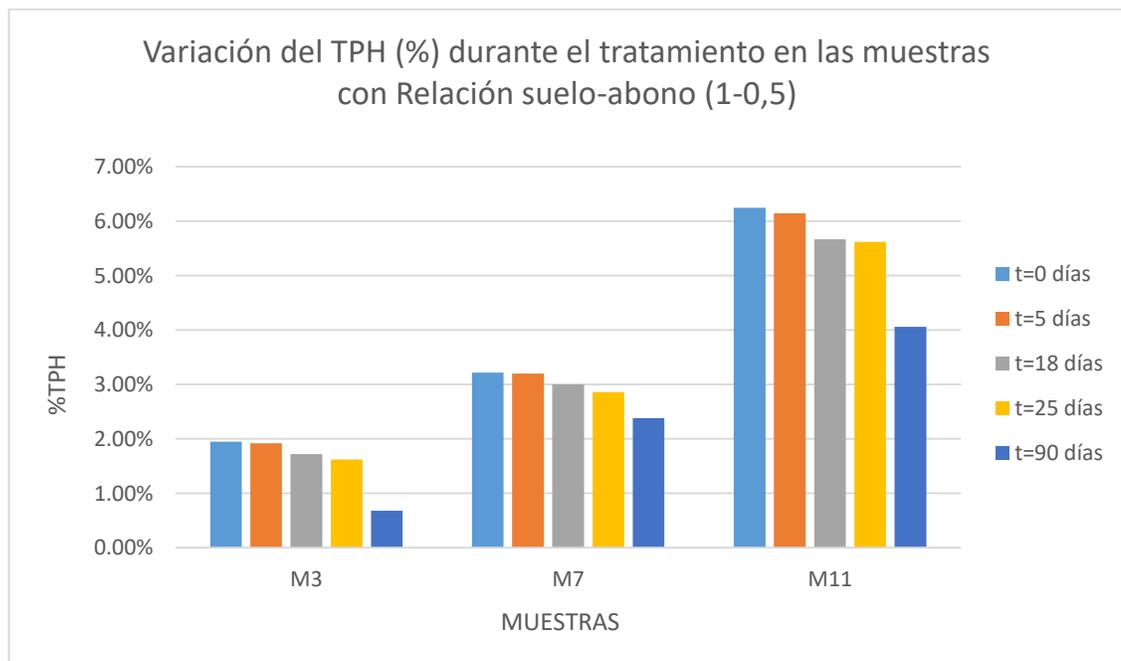
(Autores)

Gráfica 9. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-2).



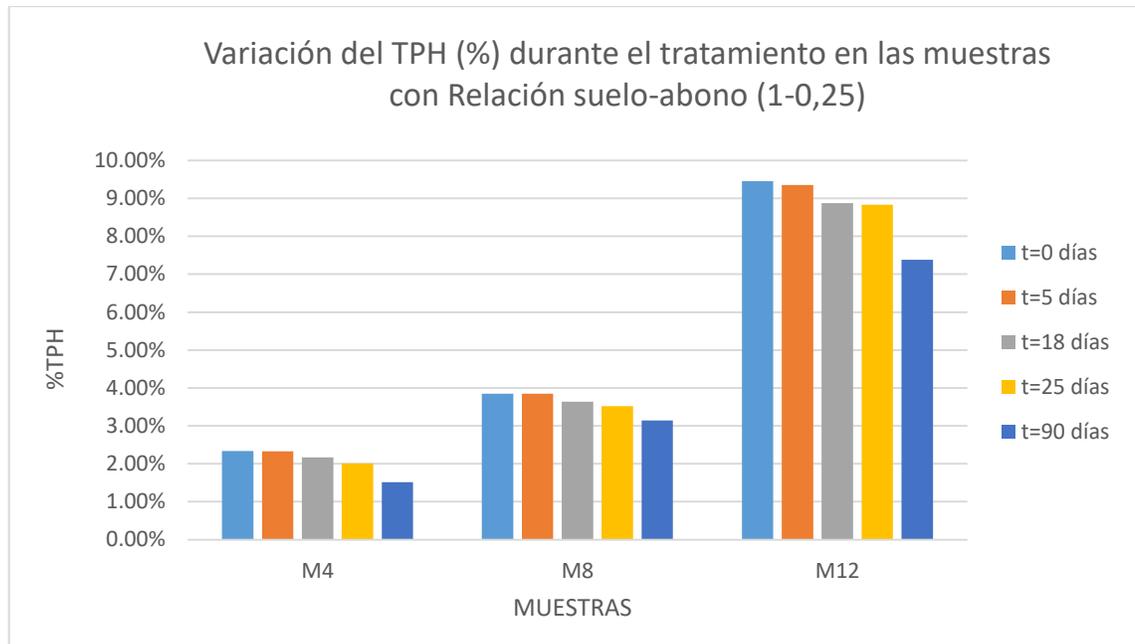
(Autores)

Gráfica 10. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-0.5).



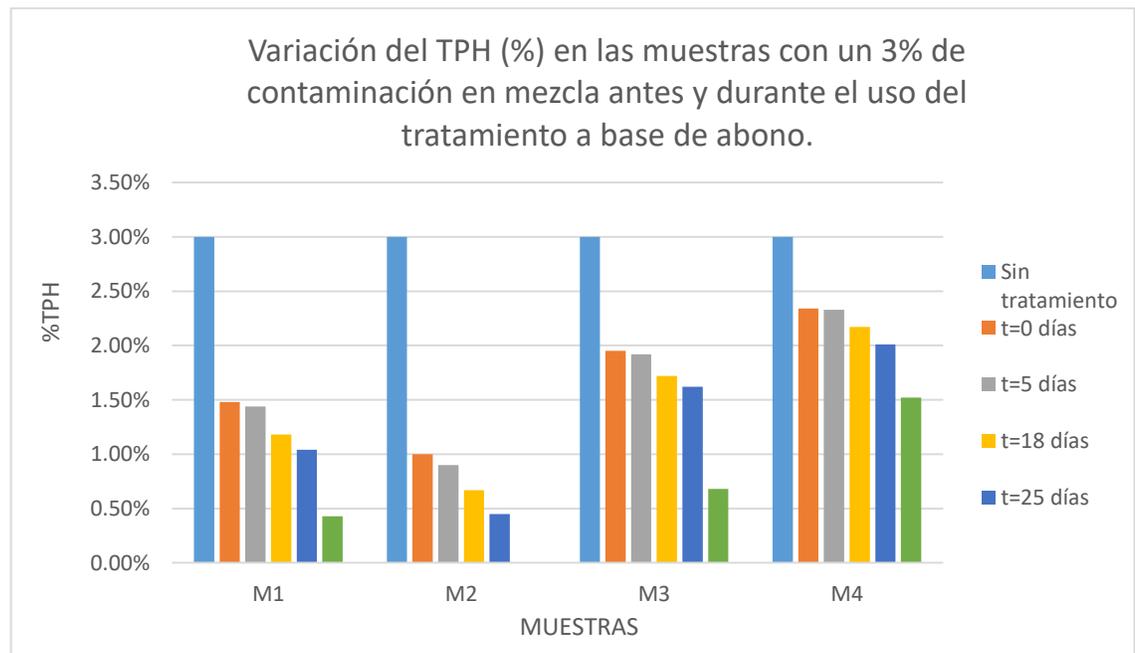
(Autores)

Gráfica 11. Variación del TPH (%) durante el tratamiento en las muestras con Relación suelo-abono (1-0.25).



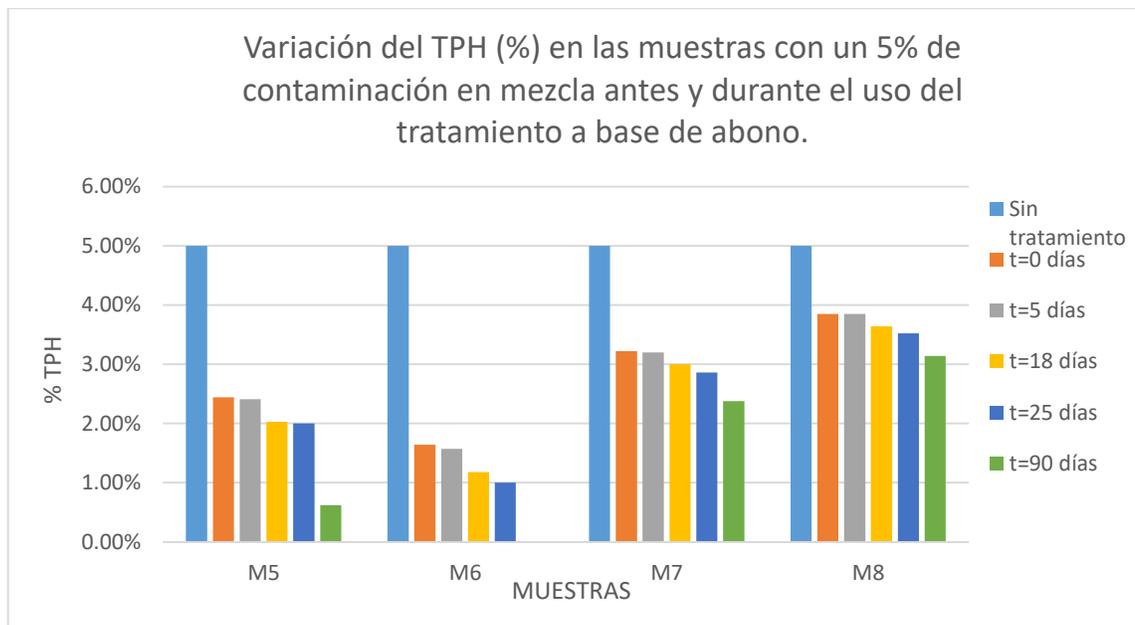
(Autores)

Gráfica 12. Variación del TPH (%) en las muestras con un 3% de contaminación en mezcla antes y durante el uso del tratamiento a base de abono.



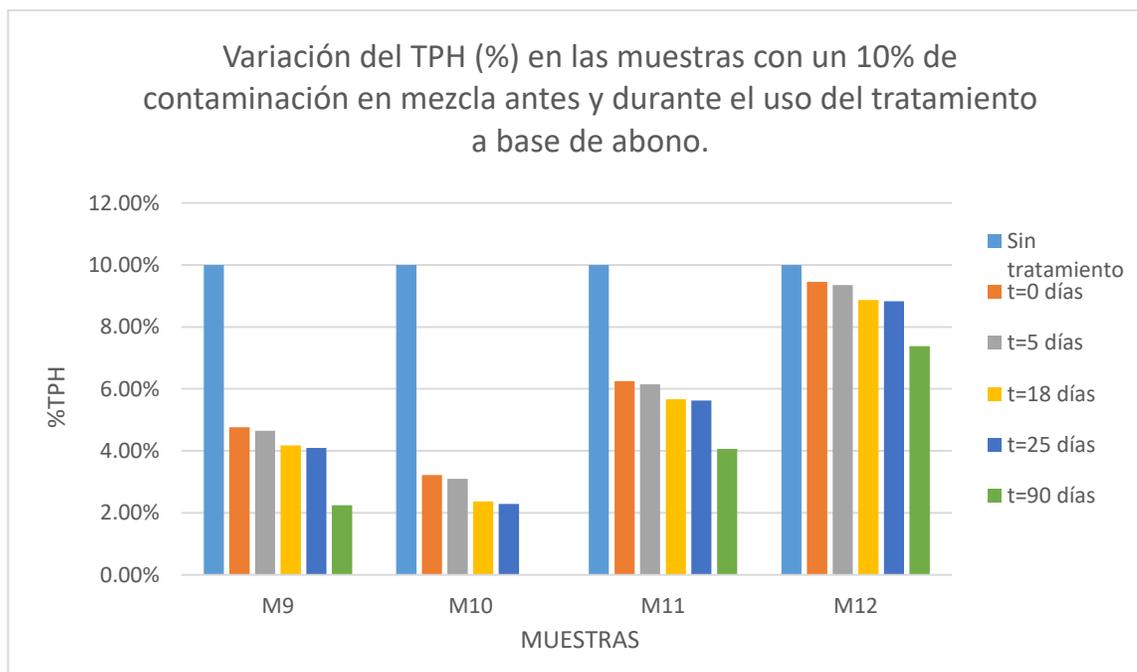
(Autores)

Gráfica 13. Variación del TPH (%) en las muestras con un 5% de contaminación en mezcla antes y durante el uso del tratamiento a base de abono.



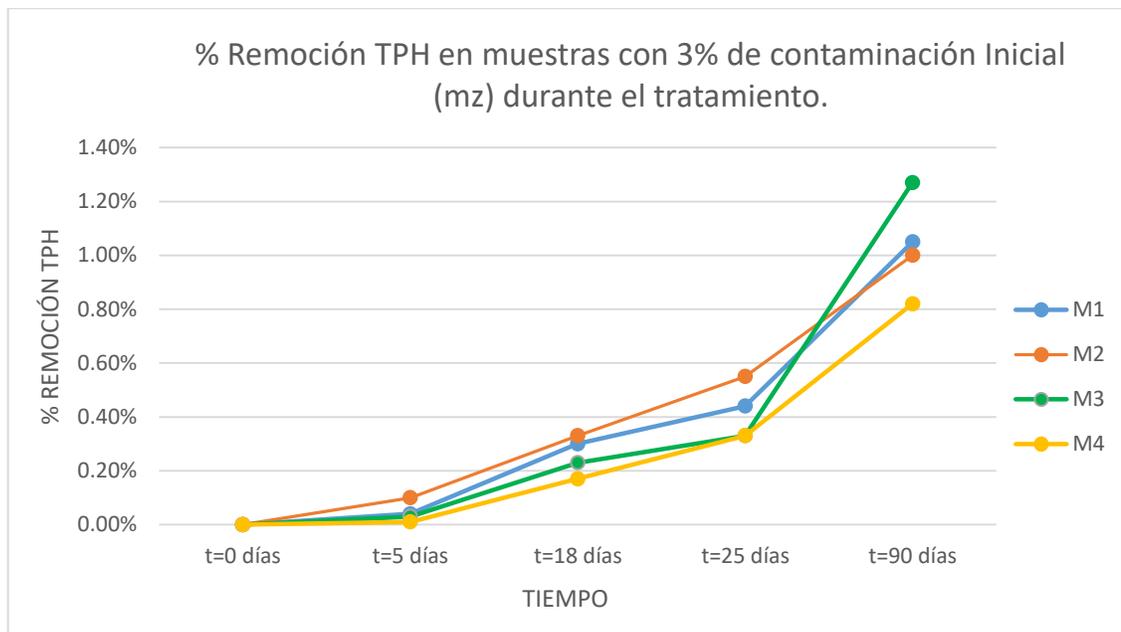
(Autores)

Gráfica 14. Variación del TPH (%) en las muestras con un 10% de contaminación en mezcla antes y durante el uso del tratamiento a base de abono.



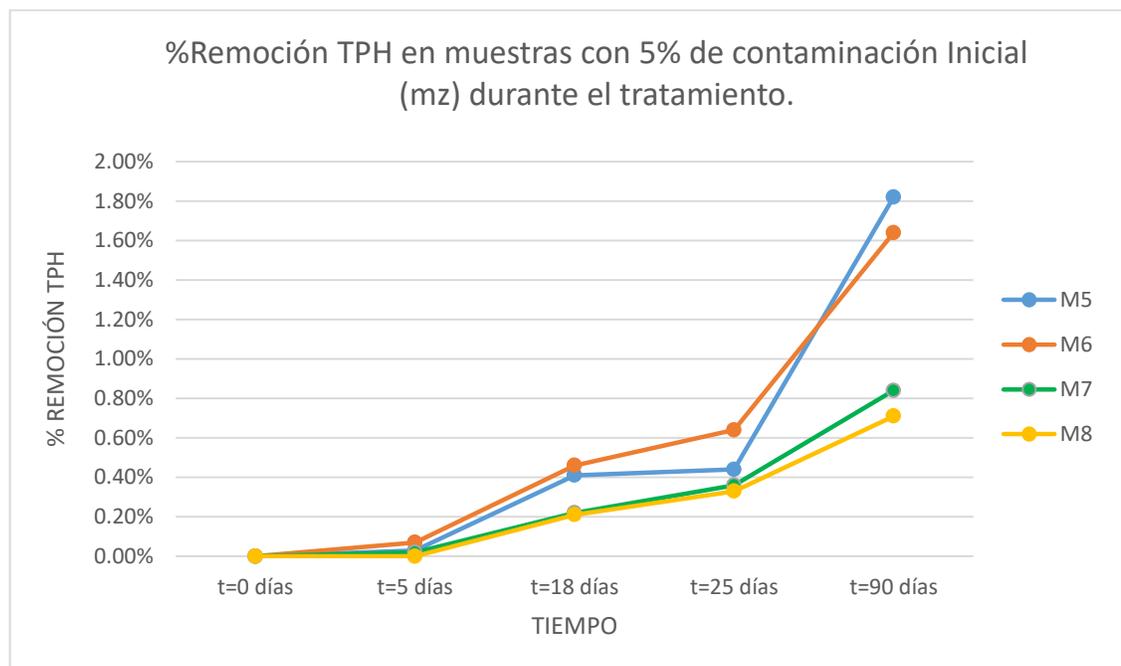
(Autores)

Gráfica 15. % Remoción TPH en muestras con 3% de contaminación Inicial (mz) durante el tratamiento.



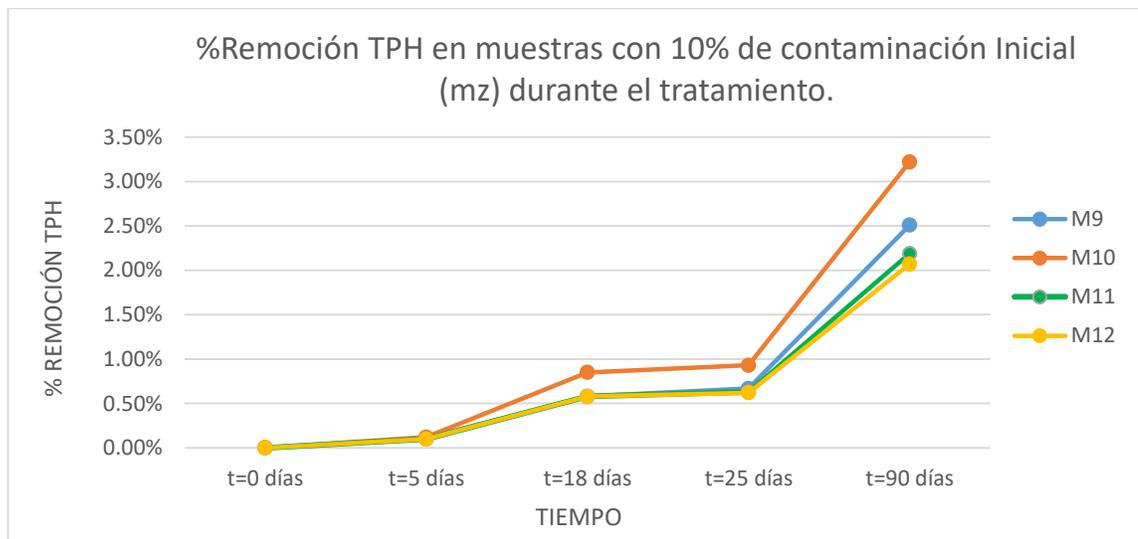
(Autores)

Gráfica 16. %Remoción TPH en muestras con 5% de contaminación Inicial (mz) durante el tratamiento.



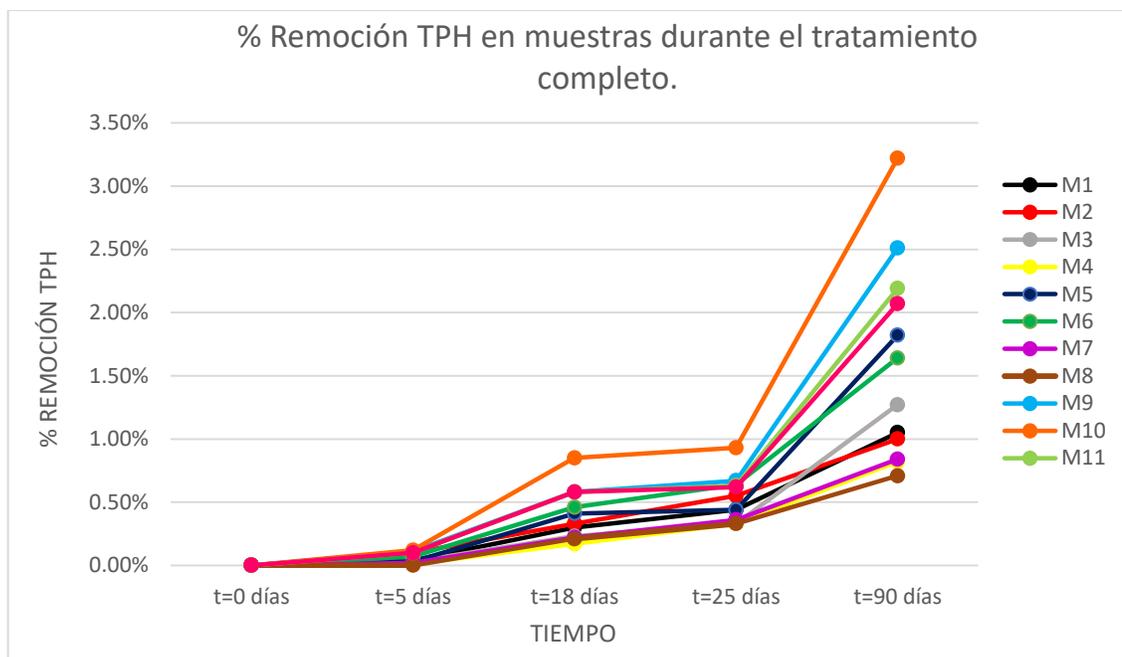
(Autores)

Gráfica 17. %Remoción TPH en muestras con 10% de contaminación Inicial (mz) durante el tratamiento.



(Autores)

Gráfica 18. % Remoción TPH en muestras durante el tratamiento completo.

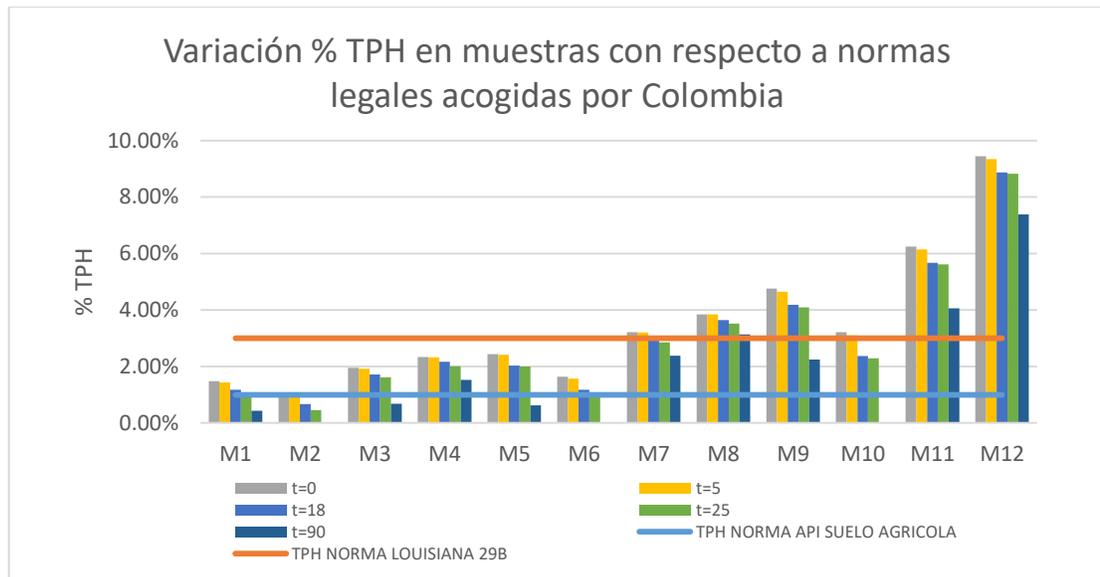


(Autores)

Debido a que Colombia no tiene propia legislación en cuanto a procesos de biorremediación, se ha acogido a normativas internacionales como se detalló previamente en el subcapítulo 2.8 “Legislación Ambiental”. A continuación, en la

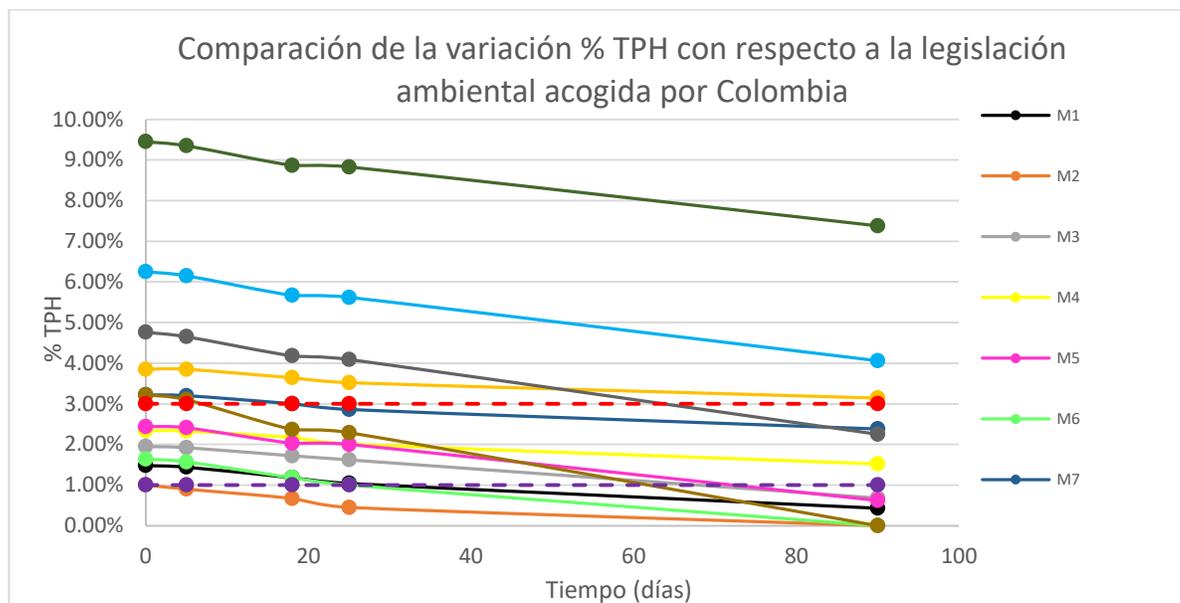
gráfica 19 se observa la comparación de los datos obtenidos con respecto a lo que las normas establecen.

Gráfica 19. Variación % TPH en muestras con respecto a normas legales acogidas por Colombia.



(Autores)

Gráfica 20. Comparación de la variación de % TPH con respecto a la legislación ambiental acogida por Colombia.



(Autores)

7.2 NUTRIENTES

Así como se logró comprobar la eficacia del abono orgánico como agente biorremediador, es conveniente de igual forma resaltar los beneficios en cuestión de nutrientes y elementos que éste le brinda al suelo en su interacción. Se conoce que el abono es una sustancia rica en nutrientes, empleada en su mayoría para mejorar las condiciones de los suelos principalmente con fines agrícolas, ya que son capaces de optimizar y recuperar la materia orgánica de los suelos, permitiendo la fijación del carbono en éste y mejorando así la capacidad de absorción de agua entre otras cosas. Teniendo en cuenta lo anterior se llevó a cabo un análisis (Ver Tabla 31) correspondiente a los nutrientes que aportó el abono al suelo tratado y como éste mejoró sus niveles de fijación de nutrientes.

Tabla 31. Aporte nutricional por parte del abono al suelo en cantidades iguales.

Nutrientes	Porcentaje en 50 Kg (1 bulto)	Gramos en 50 Kg (1 bulto)
Nitrógeno Total (N)	2,56%	1280 g
Fósforo total (P ₂ O ₅)	2,558%	1279 g
Potasio (K ₂ O)	0,517%	258,5 g
Sodio (Na)	1,056%	528 g
Calcio (Ca)	2,45%	1225 g

(Autores)

Considerando la concentración que presenta cada uno de los nutrientes se hizo un análisis correspondiente a las cantidades de abono empleadas en la elaboración del proyecto y la relación con el suelo, con la finalidad de conocer la proporción de los nutrientes que adquiere el suelo después del proceso de biorremediación. Los resultados obtenidos son resultados aproximados, de solo los nutrientes que brinda el abono, sin tener en cuenta los que proporcionan las bacterias. Para obtener datos más precisos es necesario la realización de un análisis de suelos donde se evalué la carga nutricional que adoptó el suelo después de su interacción con el abono.

Tabla 32. Aporte nutricional del abono de acuerdo a la relación suelo-abono manejado en el diseño experimental.

Relación (Suelo – Abono)	Cantidad de Suelo	Cantidad de Abono	Nutrientes				
			Nitrógeno (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potasio (K ₂ O)	Sodio (Na)	Calcio (Ca)
1 – 0,25	700 g	175 g	4,475 g	4,4765 g	0,9047 g	1,848 g	4,2875g
1 – 0,50	700 g	350 g	8,95 g	8,953 g	1,8095 g	3,696 g	8,575 g
1 – 1	700 g	700 g	17,92 g	17,906 g	3,619 g	7,392 g	17,15 g
1 – 2	700 g	1400 g	35,84 g	35,812 g	6,338 g	14,784g	34,3 g

(Autores)

8. CONCLUSIONES

- Se comprobó que el abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX cumplió con las expectativas que se tenían como agente bioremediador, debido a su alta carga orgánica y por ende su elevada presencia de bacterias y microorganismos, haciendo que los niveles de TPH disminuyeran en proporciones diferentes siguiendo el diseño experimental propuesto.
- Se puede concluir que la eficacia del abono aumenta a medida que es más alta su concentración y el tiempo al cual es expuesto el suelo. M9, M10, M11 y M12 fueron las muestras con más alta carga contaminante inicial (10%), con la presencia de 700 g, 1400 g, 350 g y 175 g respectivamente y durante el tratamiento se alcanzó una disminución respectiva de 2,51%, 3,22%, 2,19% y del 2,07% en los niveles de TPH.
- La mayor degradación de hidrocarburos se presentó en las Eras compuestas por una relación 1-2 (suelo/abono), mostrando un comportamiento desde el día 0 cuando entró en dilución muy favorable en cuanto a la disminución de los niveles de TPH. Las muestras M2, M6 y M10 (relación 1-2) fueron las únicas muestras que se biorremediaron completamente arrojando en los análisis de la serie 4 valores de 0% de TPH y una remoción de 5,86% de TPH, mientras que las muestras M1, M5 y M9 (relación 1-1) disminuyeron sus niveles de TPH al punto de cumplir con el límite máximo permisible (3%) por parte de la normatividad de Louisiana 29B y con una remoción de 5,38% de TPH, a su vez las muestras M3, M7 y M11 (relación 1-0,5) registraron en sus niveles de contaminación una disminución no tan notoria y con una remoción de 4,3% de TPH, finalmente las muestras M4, M8 y M12 (relación 1-0,25) registraron una disminución lenta comparada con las demás muestras y tan solo con un 3,6% de remoción en los niveles de TPH.
- La disminución en los valores de los TPH se hizo más notable al momento de realizar las pruebas correspondientes a la serie 4 (análisis adicional), es decir, entre los 25 y 90 días del proceso de biorremediación proporcionado a cada era, donde se encontró la eliminación total de los TPH en las muestras M2, M6 y M10, se evidenció que las muestras M1, M3, M4, M5, M7 y M9 lograron porcentajes de TPH inferiores al 3%, cumpliendo con establecido por la norma Louisiana 29B (norma a la cual Colombia se encuentra acogida).
- Comparando los porcentajes de TPH obtenidos al momento de realizar los análisis correspondientes a la serie 3 (25 días) y la serie 4 (90 días), se comprueba que el proceso de biorremediación es un tratamiento que demanda de tiempo para poder ver un decrecimiento notable. En el transcurrir de los 65 días que hubo de por medio entre las series, se logró disminuir a un 3% los TPH de 9/12 muestras.

- Para dar desarrollo al estudio investigativo y al respectivo diseño experimental propuesto, se requirió del uso de suelos provenientes de puntos ubicados a lo largo de la vía que conecta la Batería Santa Clara con diferentes locaciones de los Campos Santa Clara y Campo Palermo.
- Al usar suelos donde el porcentaje de arena era del 89%, se presentó gran dificultad al momento de realizar las pruebas, debido a que a la hora de realizar el proceso de filtrado el paso de dicha arena era inevitable afectando los resultados a la hora de pesar el residuo obtenido después de evaporar, es por esto que se decidió mejorar la técnica del filtrado, empleando doble muselina para evitar alteraciones en las pruebas siguientes.
- Al ser el abono un producto comprobado para ser usado como agente bioremediador, abre una gran ventana a las diferentes empresas que tienen adjudicados pozos en la región del Huila-Caquetá, empleado como una técnica de biorremediación aplicado a diversos casos de contaminación a los que se encuentra expuesta la industria petrolera durante el desarrollo de cada una de las fases que componen esta.
- En el lugar donde se encontraban las Eras ubicadas, a los 10 días después del tratamiento ya no era perceptible al ambiente el olor a hidrocarburo que antes emanaban a temperatura ambiente.

9. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados positivos obtenidos durante la realización de este proyecto de grado, es importante resaltar cada una de las sugerencias propuestas, con la finalidad de que sirvan como precedente para los trabajos de investigación que se desarrollen a futuro. A continuación, se mencionan dichos aspectos a tener en cuenta:

- Después de evidenciar los resultados positivos del proyecto, resulta necesario seguir con el experimento, implementando un diseño experimental donde se estipule un número mayor de días para el tratamiento para evaluar el tiempo necesario para que todas las muestras logren llegar a un 0% de TPH.
- Respecto a los análisis fisicoquímicos del suelo, se considera importante la realización de dichas pruebas en suelos después de ser contaminados con hidrocarburos y en los suelos tratados con el abono 100% orgánico, de modo que sea posible evaluar el cambio de las características del suelo cuando reaccionan con estas sustancias. En este proyecto esos análisis no fueron posibles de realizar debido a la ausencia de equipos calificados y compatibles con la presencia de aceites, grasas y materia prima presente en los abonos.
- Se recomienda con respecto al uso de abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX empleado como agente bioremediador, la implementación y estudio de otros tipos de abonos o productos provenientes de compostaje, es decir, de diferentes clases y tipos, concentraciones, procedencia, composición, etc.
- Se recomienda el uso de un cromatógrafo de gases calibrado con el fin de determinar los compuestos presentes en la muestra contaminada y sus respectivas proporciones.
- A través del desarrollo de este proyecto surge la necesidad de seguir investigando en el área de biorremediación, puesto que es un área muy extensa, que abarca muchos elementos de la naturaleza que usualmente no se tendrían en cuenta para emplear en procesos de remediación y contingencia y que hasta el momento se están empezando a implementar en la industria de los hidrocarburos; se debe resaltar que el campo de acción es enorme y tiene un sinnúmero de aplicaciones novedosas que se pueden descubrir mediante el estudio y la innovación.

10. BIBLIOGRAFÍA

- ALEMÁN, A. (2009). *Determinación de hidrocarburos totales del petróleo en suelos y sedimentos de la cuenca del río Coatzacoalcos*. Universidad Veracruzana, Facultad Ciencias Químicas. Coatzacoalcos, Venezuela.
- ALEXANDER, M. (1995). *Biodegradation and bioremediation*. Academic Press, San Diego.
- ÁLVAREZ, J. GARCÍA, L. (2015). *Evaluación de la disminución de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos impregnados con residuos de fluidos de perforación base aceite de higuera y bases fuertes*. Universidad Surcolombiana. Neiva, Huila.
- ANSONERA, J. (1994). *Composición y propiedades físicas del suelo*. Sustrai, 22-25.
- ASTDR, (1998). *“Reseña Toxicológica de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)”*. Atlanta, EE.UU., Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- ATLAS R.M. (1981). *Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: An Environmental Perspective*. Ed. Microbiological Reviews. Vol: 45. Págs. 180-209.
- BENAVIDEZ L. JOAQUÍN, QUINTERO G., GUEVARA A., CÁCERES D., GUTIÉRREZ S., MIRANDA J.; (2006). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo*. NOVA publicación científica. Colombia.
- BUENDÍA H. (2012). *REVISTA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM: Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol*.
- BOUKIR. A, et al. (2001). *Subfractionation, characterization and photooxidation of crude oil resins*. Elsevier, Vol 3. Págs 279-286.
- CANALS, M.; (2005). *“Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica”*, Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, Facultad de Biología, Departamento de microbiología, Barcelona, España.
- CASTELBLANCO, I., NIÑO, J. (2011). *Manejo y tratamiento actual de residuos aceitosos en la industria petrolera Colombiana*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

- CHAN, J. (2015). *Evaluación de la degradación de hidrocarburos totales del petróleo por bioestimulación con abonos orgánicos asociados a especies arbóreas*. Tesis doctoral. ECOSUR. Villahermosa, Tabasco, México.
- COLOMBIA ENERGÍA. (2014). *La revista de la industria energética colombiana*.
- CHURCHILL, S. A., J. P. HARPER Y P. F. CHURCHILL. (1999). *Isolation and characterization of a Mycobacterium species capable of degrading three- and four-ring aromatic and aliphatic hydrocarbons*. Appl. Environ. Microbiol. 65:549-552.
- DAS, N., CHANDRAN, P. (2011). *Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview*. Biotechnol. Res. Int., 2011, 941810.
- EPA (1994): *Technologies of bioremediation for soil contaminated with hydrocarbons*. Disponible en internet: <http://www.epa.usace.army.mil/net/usace-docs/eng/pamphlets/epa200-1-10/c-4/pdf>.
- EPA (2006). *3540C Method Soxhlet Extraction SW-846 Test Methods*.
- EWEIS, J., ERGAS, S., CHANG, D., SCHROEDER, E. (1999). *Principios de Biorrecuperación: Tratamientos para la descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y físico-químicos*. España. Editoria McGraw Hill/Interamericana de España S. A. U.
- FERNANDEZ, C. LABRADOR, H. LLOBREGAT, M. MÉNDEZ, L. BASTIDAS, H. SIEN, BONNIE. (2009). *Efectos del estiércol equino y del humus líquido en el proceso de biodegradación de un suelo contaminado con petróleo*. Universidad de Carabobo, Centro de Investigaciones Ambientales. Carabobo. Venezuela.
- FERNÁNDEZ, R. (2006). *Monitoring photooxidation of the Prestige's oil spill by attenuated total reflectance infrared spectroscopy*. Elsevier. Vol 69. Págs 409-417.
- GALLEGO, P., R. CUÉLLAR Y J. DUSSÁN, (2004). *"Biorremediación de residuos de petróleo"*. España.
- HAMEL, J. F. (2009). *"Determinación Cromatográfica De Hidrocarburos Totales En Aguas Por Microextracción En Fase Sólida"*. ISSN 2075-8944 Jurnal Boliviano de Ciencias, volumen 6 numero.
- HESNAWI RAFIK, MOGADAMI FARID. (2013). *Bioremediation of Libyan Crude Oil-Contaminated Soil under Mesophilic and Thermophilic Conditions*. Al-zaytouna University, Libya.
- IBARRA, D. (2008). *Evaluación del potencial de biodegradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados procedentes de petrosantander (Colombia) Inc*. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Ambiental. Bucaramanga. Colombia.

ITURBE, R. ROLDÁN, A. *Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.

KOSTAS, J. L. (1993). *“Course Practical Asphaltenes Solutions & Management”*. Universidad Surcolombiana. p. 1-13.

Louisiana Administrative Code (2010). Title 43, Natural Resources. Part XIX.

MANUAL DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SUELOS APLICADOS A LA REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS. (2006) Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.

ÑUSTEZ, D. (2012). *Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. Colombia.

OROSCO, V., SORIA, M. (2008). *Biorremediación de vegetación contaminada con petróleo por derrames en el campamento Guarumo-Petroproducción*. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo. Riomanma-Ecuador.

ORTEGA, M. (2012). *Modelización de un proceso de biorremediación de suelos contaminados con gasoil*. Departamento de Ingeniería Química y Combustibles. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid, España.

PELLINI, L. (2006). *Biorremediación estimulada por efluentes cloacales tratados de suelos contaminados con hidrocarburos*. Escuela Superior de Salud y Ambiente, Universidad Nacional de Comahue. Neuquén, Argentina.

PONS, M. GUERRERO, A. ZAVALA, J. ALARCÓN, A. (2011). *Extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en suelos con características físicas y químicas diferentes*. Instituto Mexicano del Petróleo (MPJ). Universidad y Ciencia Trópico Húmedo. Distrito Federal.

RAMIREZ, J. TRUJILLO, A. (2012). *Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia*. UNAL. Medellín. Colombia.

RINCÓN, M. (2004). *Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia.

ROSSINI, F. D. (1960). *“Hydrocarbons in petroleum”*. Journal of Chem.Educ.Cap. 39: p. 554-561.

RUBIANO, H. (2010). *La industria petrolera en el Huila en la década del 90*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia.

SALGADO, R., PINEDA, G., MESTA, A. M., DÍAZ, F., WANG, T. (2008). *Degradación de n-alcanos por Pseudomonas aeruginosa MGP-1*. Universidad Simón Bolívar. Investigación Universitaria Multidisciplinaria Año 7, N°7: 123-132.

SÁNCHEZ, P., VOLKE, V., LINARES, L., RODRÍGUEZ, R., RIVERA, M., FERRERA, R. (2004). *Descontaminación de suelos con petróleo crudo mediante microorganismos autóctonos y pasto alemán*. Revista Agrociencia. 38(001): 1-12.

SAVAL, S. (2013). *Bases Bioquímicas de la Bioremediación*. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

SPEIGHT, J. G. (1991). *"The chemistry and technology of petroleum"*. John Wiley and Sons. New York..

TORRES D., ZULUAGA T. (2009). *TESIS: Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos*, UNAL. Colombia.

US-EPA. (2000). *Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications*, Vol. EPA-542-R-00-008.

USDA (1951). *United States Department of Agriculture*. Soil Survey Staff.

Van Straalen, N. M. (2002). *Assessment of soil contamination-a functional perspective*. Biodegradation, 13(1), 41-52.

VELASCO, J., VOLKE, TANIA. (2003). *Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*. Cenica (Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental). México, D.F.

Whise, D. L. (2000). *Bioremediation of contaminated soils*. Marcel Decker. New York.

Zamora, A.

Xu, Yang. (2013). *Successful bioremediation of an aged heavily contaminated soil using a microbial/plant combination strategy*. Journal of Hazardous Materials 264 (2014) 430– 438.

ANEXO A

CASO REAL

El día 1 de octubre del año 2016 ocurrió un accidente de tránsito en la vía que conduce de Neiva al municipio de Garzón más exactamente en el kilómetro 250+500 a la altura del sitio conocido como Rio Loro, en donde un carro tanque afiliado a la empresa de transporte pesado INVERTRAC S.A. que transportaba crudo, por exceso de velocidad colisionó y ocasionó el derrame de uno de sus compartimientos que contenía aproximadamente 3000 galones de crudo, afectando aproximadamente 2 kilómetros de vegetación nativa que se encuentra al costado izquierdo de la vía.

Ilustración 34. Toma de muestras en el lugar el derrame (accidente). Caso real.



(Autores)

A raíz de este incidente, se realizó una visita a la zona afectada donde se tuvo acceso a sectores que se encontraban contaminados por el hidrocarburo y donde fue posible la toma de muestras que fueron empleadas en un ensayo donde se buscó comprobar la efectividad del abono orgánico como agente biorremediador desde una perspectiva de caso real.

Ilustración 35. Muestras tomadas. Caso real.



(Autores)

Estas muestras se almacenaron en un recipiente hermético dentro del laboratorio de lodos de la Universidad Surcolombiana, a condiciones ambiente, para que sus características y propiedades se conservaran hasta el día del montaje de las muestras y comenzara el proceso de biorremediación.

El día 26 de octubre se realizó la primera prueba que corresponde al tiempo 0, es decir antes de realizar la adición del abono, con el objetivo de conocer el valor de contaminación que presentaba la muestra y así tener un valor de partida con el que fuera posible comparar los resultados de remoción después de la remediación y a diferentes tiempos de interacción. Para realizar esta prueba fue necesario homogenizar todas las 6 muestras extraídas de diferentes locaciones que presentaban contaminación, con el fin de obtener una muestra global con únicas propiedades. Este análisis arrojó los siguientes resultados.

Tabla 33. % TPH Inicial a t= 0 días de la muestra global tomada. Caso real.

TPH's Iniciales (Sin tratamiento)						
Muestra	Cantidad Total	Suelo empleado	Cápsula Vacía (g)	Cápsula Con Hycs (g)	Hycs (g)	TPH t=0 (%)
Global	2800 g	1 g	50,9542	51,3405	0,3863	38,63%

(Autores)

El día 2 de noviembre se llevó a cabo el montaje de las muestras contaminadas donde se procedió a dividir la muestra global (homogenizada) en 4 muestras de 700 gramos cada una, teniendo en cuenta las relaciones suelo – abono

estipuladas en el diseño experimental planteado para el desarrollo de la investigación, de la siguiente manera.

Tabla 34. Relación suelo-abono para el tratamiento a aplicar en las muestras. Caso real.

Muestra	Relación Suelo-Abono	Suelo Contaminado (g)	Abono
1	1-0,25	700	175
2	1-0,5	700	350
3	1-1	700	700
4	1-2	700	1400

(Autores)

El día 8 de noviembre se realizó la segunda prueba de laboratorio correspondiente al día número 5 en el proceso de biorremediación, empleando el “método gravimétrico modificado”; ésta se llevó a cabo bajo los mismos parámetros y condiciones (Página 66 – 68) empleados en las anteriores pruebas realizadas en este proyecto, arrojando los siguientes resultados.

Tabla 35. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 5 días. Caso real.

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=5 (%)
M1	0,3863	38,63	30,904	50,4325	50,741	0,3085	30,85
M 2	0,3863	38,63	25,753	50,5918	50,8475	0,2557	25,57
M 3	0,3863	38,63	19,315	50,4914	50,681	0,1896	18,96
M 4	0,3863	38,63	12,876	50,5677	50,688	0,1203	12,03

(Autores)

El día 21 de noviembre se llevó a cabo la tercera serie de pruebas que correspondieron al día número 18 en el proceso de biorremediación, empleando de igual forma el “método gravimétrico modificado”, los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Tabla 36. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 18 días. Caso real.

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=18 (%)
M1	0,3863	38,63	0,30904	50,8411	51,1323	0,2912	29,12
M 2	0,3863	38,63	0,25753	50,5678	50,8064	0,2386	23,86
M 3	0,3863	38,63	0,19315	50,7769	50,9495	0,1726	17,26
M 4	0,3863	38,63	0,12876	50,8592	50,9655	0,1063	10,63

(Autores)

El día 28 de noviembre se desarrolló el último grupo de pruebas correspondientes al día número 25 del proceso de biorremediación, bajo el “método gravimétrico modificado” elaboradas de la misma forma que las demás pruebas, los resultados alcanzados fueron los siguientes.

Tabla 36. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 25 días. Caso real.

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=25 (%)
M1	0,3863	38,63	0,30904	50,8315	51,1186	0,2871	28,71
M 2	0,3863	38,63	0,25753	50,4522	50,6861	0,2339	23,39
M 3	0,3863	38,63	0,19315	50,8593	51,0275	0,1682	16,82
M 4	0,3863	38,63	0,12876	50,5679	50,6652	0,0973	9,73

(Autores)

Teniendo en cuenta que la metodología que se empleó en la realización de estos análisis fue la misma que se llevó a cabo en todas las demás pruebas realizadas en el desarrollo experimental del proyecto, es necesario evaluar los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) a los 90 días del proceso de biorremediación donde se esperaba que las muestras al tener un tiempo de interacción considerablemente mayor con el agente biorremediador (Abono), el porcentaje de remoción hubiera aumentado considerablemente. Esta serie de pruebas realizada a los 90 días, arrojó los siguientes resultados.

Tabla 378. Reporte de datos obtenidos a tiempo de 90 días. Caso real.

Muestra	Hycs Iniciales (gr)	TPH sin tratamiento (%)	TPH Dilución t=0 (%)	Cápsula Vacía (gr)	Cápsula con Hycs (gr)	Hycs Finales (gr)	TPH t=90 (%)
M1	0,3863	38,63	0,30904	50,4914	50,7279	0,2365	23,65
M 2	0,3863	38,63	0,25753	50,5678	50,7481	0,1803	18,03
M 3	0,3863	38,63	0,19315	50,8409	50,9446	0,1037	10,37
M 4	0,3863	38,63	0,12876	50,7768	50,8084	0,0316	3,16

(Autores)

En la siguiente tabla se recopilan todos los resultados obtenidos en cada una de las series de pruebas realizadas, evaluando tanto los TPH de dilución, que corresponden a los hidrocarburos disueltos en el abono, como los porcentajes de remoción que muestran el resultado final de la disminución de los hidrocarburos que se encontraban presentes en el suelo, tal como se ilustra a continuación.

Tabla 38. Reporte de datos obtenidos durante todo el tratamiento. Caso real.

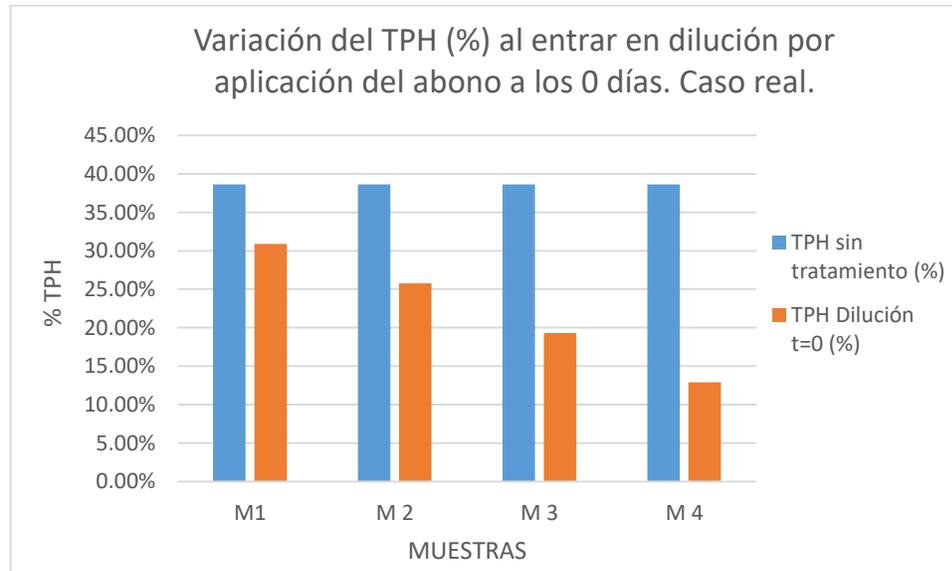
Era	Suelo + hyc (gr)	Abono	%TPH sin tratamiento	%TPH de Dilución en 1 gr					% REMOCIÓN TPH			
				t=0	t=5	t=18	t=25	t=90	t=5	t=18	t=25	t=90
1	700	175	38,63	30,90 4	30,8 5	29,1 2	28,7 1	23,6 5	0,05 4	1,78 4	2,19 4	7,25 4
2	700	350	38,63	25,75 3	25,5 7	23,8 6	23,3 9	18,0 3	0,18 3	1,89 3	2,36 3	7,72 3
3	700	700	38,63	19,31 5	18,9 6	17,2 6	16,8 2	10,3 7	0,35 5	2,05 5	2,49 5	8,94 5
4	700	1400	38,63	12,87 6	12,0 3	10,6 3	9,73	3,16	0,84 6	2,24 6	3,14 6	9,71 6

(Autores)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al momento de aplicar el tratamiento a base de abono orgánico a cada una de las muestras teniendo en cuenta el diseño experimental previamente planteado, hubo una disminución inicial a 0 días en el %TPH debido a la dilución a la cual fue expuesta (Ver Gráfico 2.).

Gráfica 21. Variación del TPH (%) al entrar en dilución por aplicación del abono a los 0 días. Caso real.



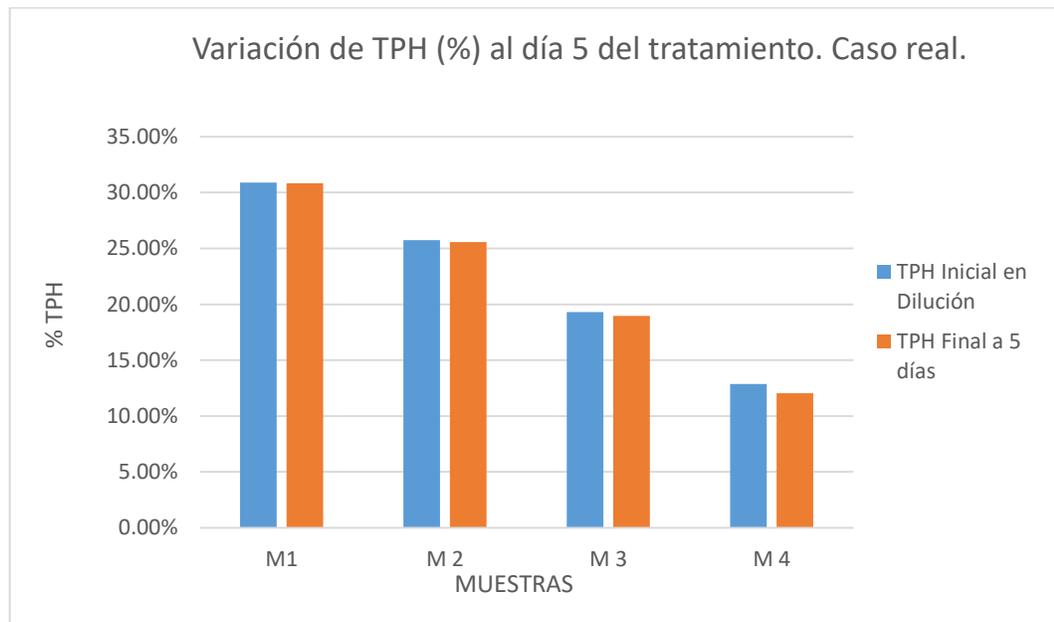
(Autores)

Al analizar los resultados de TPH obtenidos en cada una de las series de pruebas realizadas, se puede observar una reducción positiva en la cantidad de Hidrocarburos Totales de Petróleo con respecto a un tiempo 0 de expuestas al tratamiento, lo cual comprueba la capacidad y eficacia que tiene el abono de ser empleado como agente bioremediador aplicado a suelos.

La primera serie de análisis de la variación de los niveles de TPH se realizó a los 5 días después de exponer las 4 muestras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico 3.) se puede analizar que:

- La Muestra 1 con relación 1-0,25, mostró una disminución de 0,054% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 2 con relación 1-0,5, presentó una disminución de 0,183% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 3 con relación 1-1, presentó una mayor tasa de biorremediación. La disminución evidenciada fue de 0,355% en los niveles de TPH.
- La Muestra 4 con relación 1-2, mostró la mayor tasa de biorremediación debido a ser la muestra expuesta a la más alta cantidad de tratamiento (abono). La disminución en el nivel de TPH fue de 0,846%.

Gráfica 22. Variación de TPH (%) al día 5 del tratamiento. Caso real.

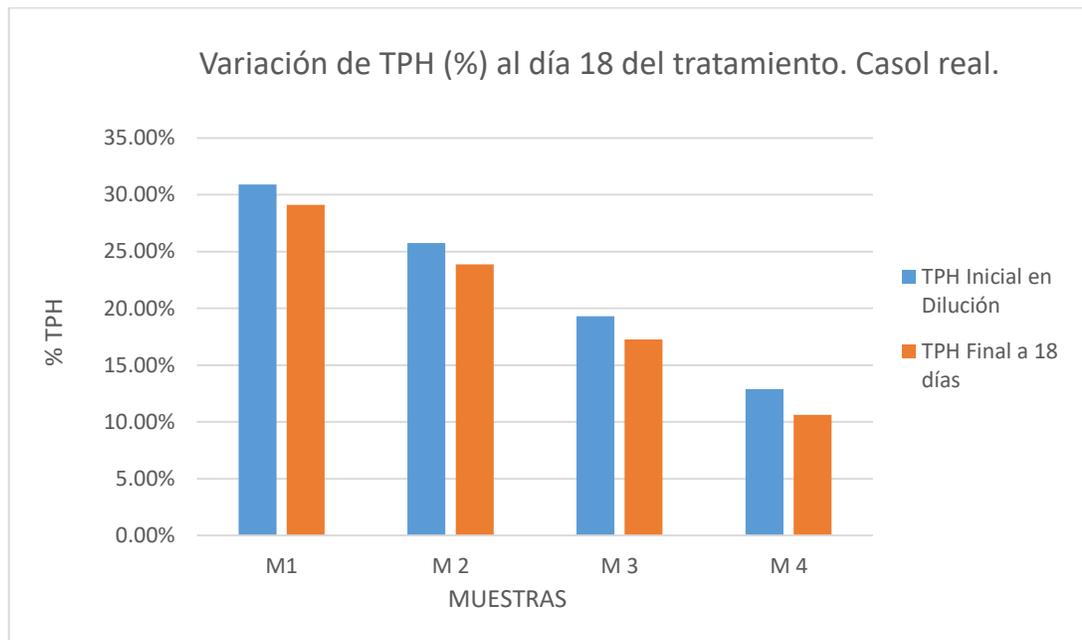


(Autores)

La segunda serie de análisis de variación de los niveles de TPH se realizó a los 18 días después de exponer las 4 muestras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico X.) se puede analizar que:

- La Muestra 1 con relación 1-0,25, mostró una disminución de 1,784% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 2 con relación 1-0,5, presentó una disminución de 1,893% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 3 con relación 1-1, presentó una mayor tasa de biorremediación. La disminución evidenciada fue de 2,055% en los niveles de TPH.
- La Muestra 4 con relación 1-2, mostró la mayor tasa de biorremediación debido a ser la muestra expuesta a la más alta cantidad de tratamiento (abono). La disminución en el nivel de TPH fue de 2,246%.

Gráfica 23. Variación de TPH (%) al día 18 del tratamiento. Caso real.

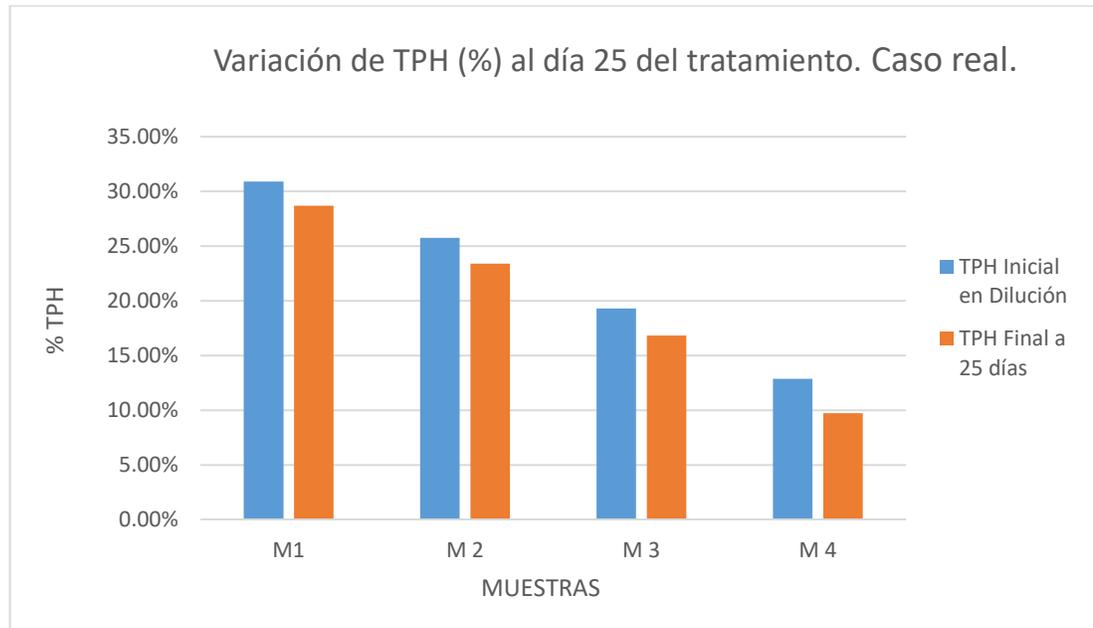


(Autores)

La tercera serie de análisis de variación de los niveles de TPH se realizó a los 25 días después de exponer las 4 muestras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico X.) se puede analizar que:

- La Muestra 1 con relación 1-0,25, mostró una disminución de 2,194% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 2 con relación 1-0,5, presentó una disminución de 2,363% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 3 con relación 1-1, presentó una mayor tasa de biorremediación. La disminución evidenciada fue de 2,495% en los niveles de TPH.
- La Muestra 4 con relación 1-2, mostró la mayor tasa de biorremediación debido a ser la muestra expuesta a la más alta cantidad de tratamiento (abono). La disminución en el nivel de TPH fue de 3,146%.

Gráfica 24. Variación de TPH (%) al día 25 del tratamiento. Caso real.

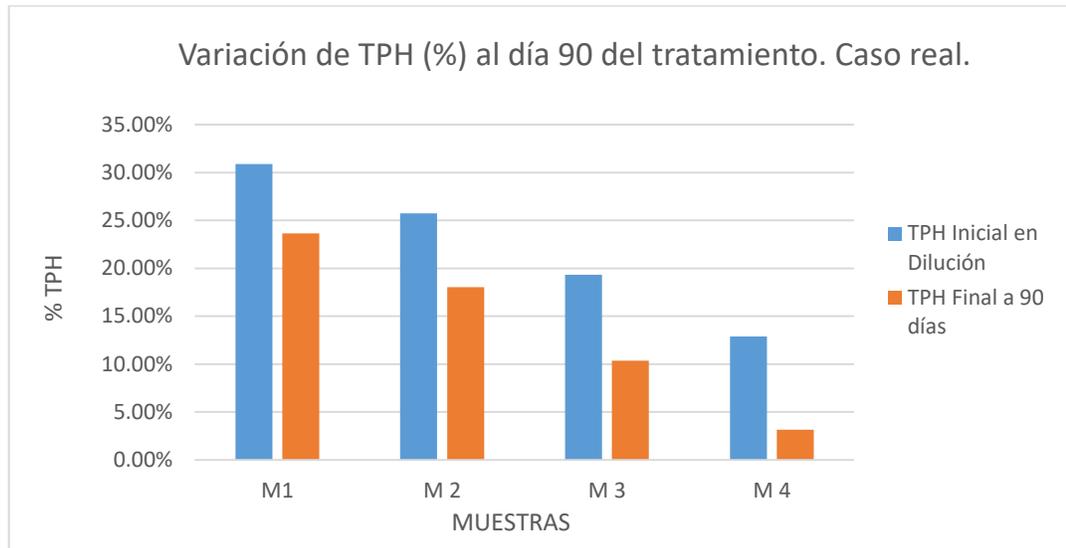


(Autores)

La cuarta y última serie de análisis de variación de los niveles de TPH se realizó a los 90 días después de exponer las 4 muestras al tratamiento con el abono. En los resultados obtenidos (Ver Gráfico X.) se puede analizar que:

- La Muestra 1 con relación 1-0,25, mostró una disminución de 7,254% en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 2 con relación 1-0,5, presentó una disminución de 7,723 % en los niveles de TPH (%).
- La Muestra 3 con relación 1-1, presentó una mayor tasa de biorremediación. La disminución evidenciada fue de 8,945% en los niveles de TPH.
- La Muestra 4 con relación 1-2, mostró la mayor tasa de biorremediación debido a ser la muestra expuesta a la más alta cantidad de tratamiento (abono). La disminución en el nivel de TPH fue de 9,716%.

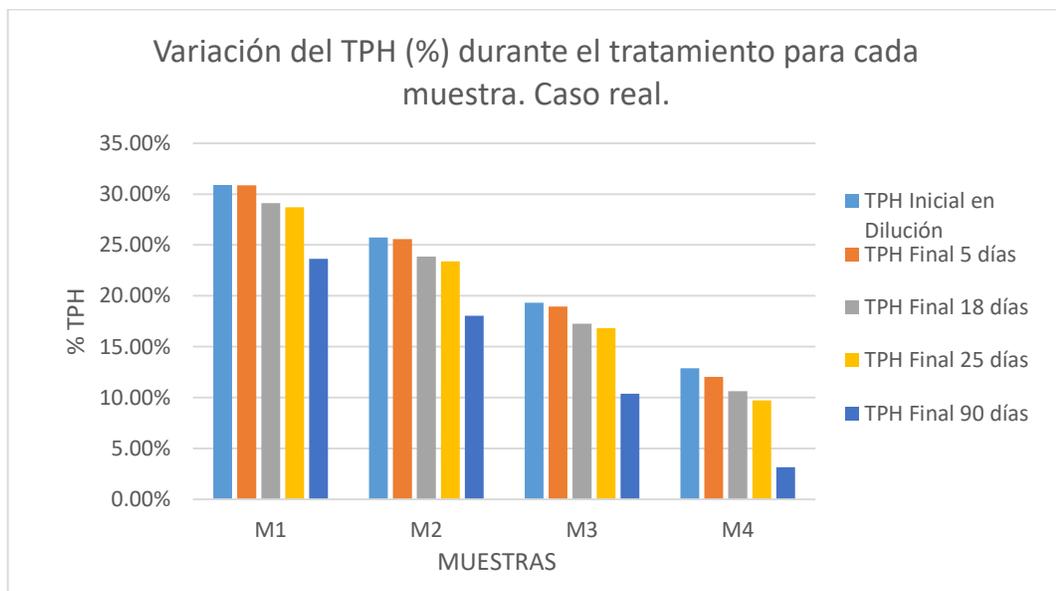
Gráfica 25. Variación de TPH (%) al día 90 del tratamiento. Caso real.



(Autores)

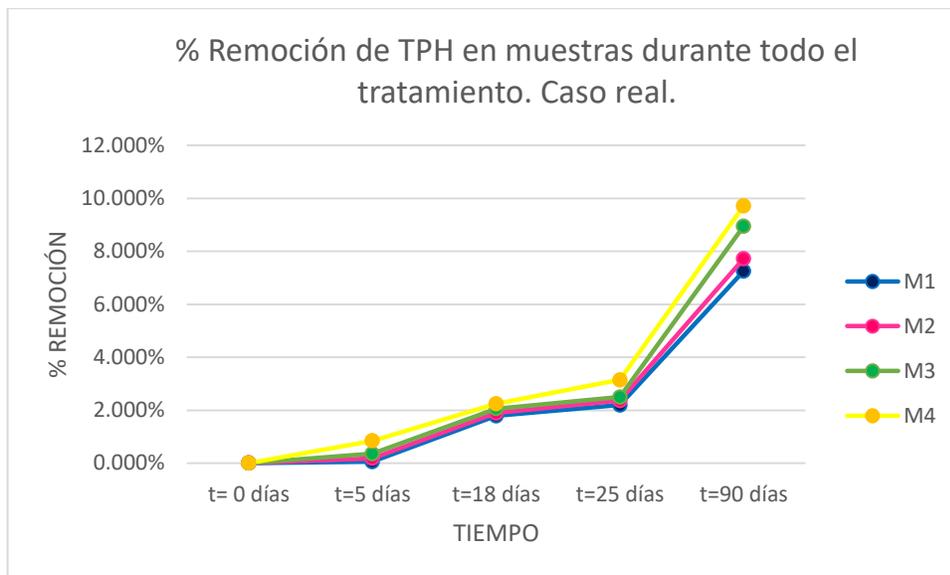
Analizando el comportamiento de cada una de las muestras a lo largo del desarrollo del tratamiento, se puede observar que la eficacia del abono aumenta a medida que es más alta su concentración y el tiempo al cual es expuesto el suelo, independientemente de la carga contaminante a la cual sea expuesta.

Gráfica 26. Variación del TPH (%) durante el tratamiento para cada muestra. Caso real.



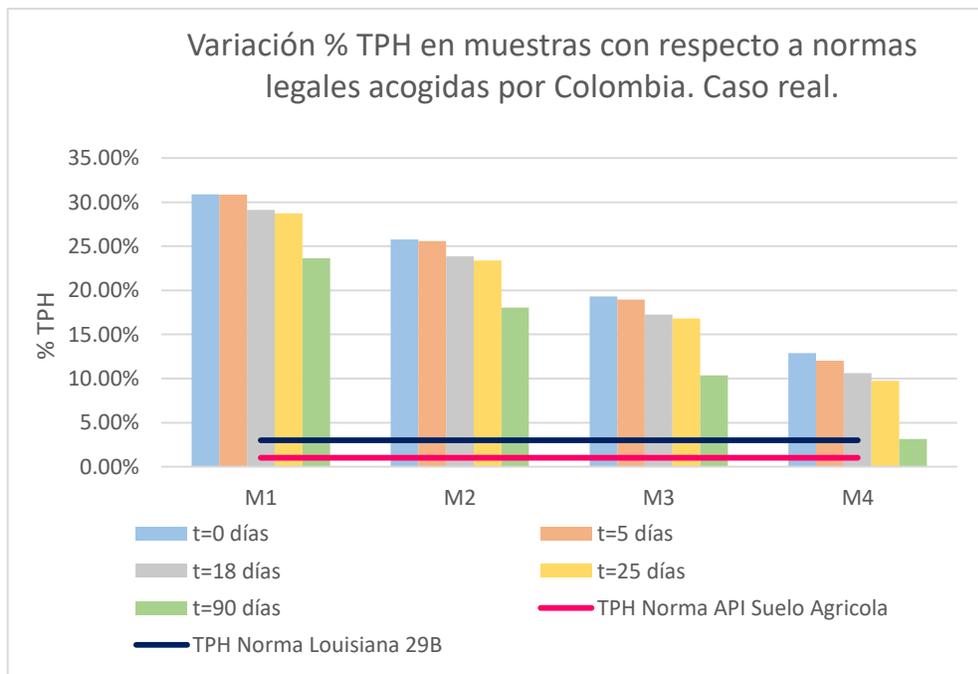
(Autores)

Gráfica 27. % Remoción de TPH en muestras durante todo el tratamiento. Caso real.



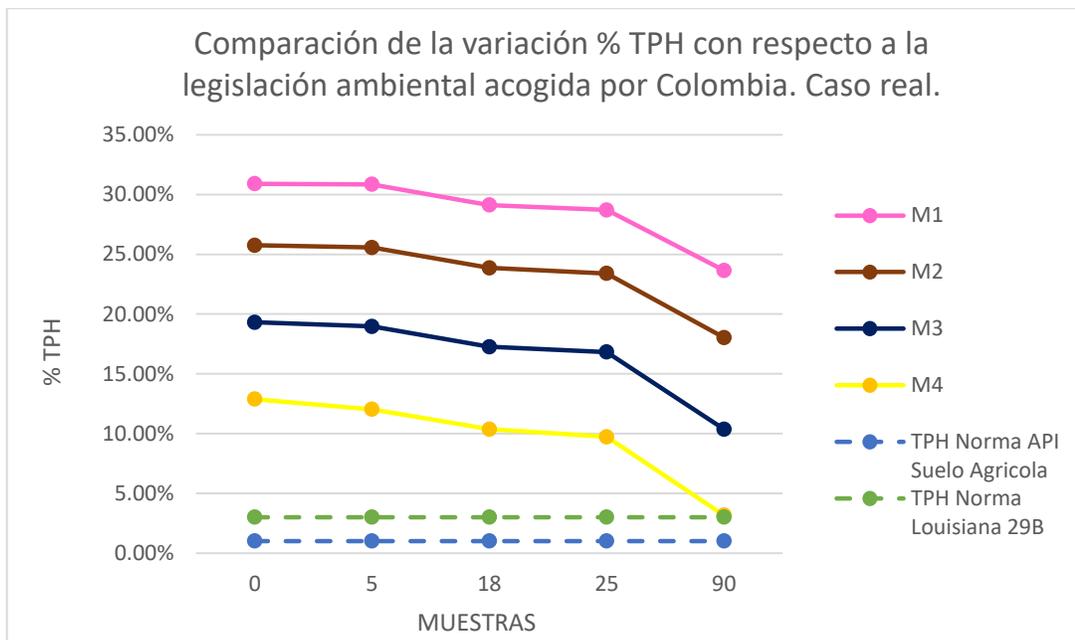
(Autores)

Gráfica 28. Variación % TPH en muestras con respecto a normas legales acogidas por Colombia. Caso real.



(Autores)

Gráfica 29. Comparación de la variación % TPH con respecto a la legislación ambiental acogida por Colombia. Caso real.



(Autores)

CONCLUSIONES

Analizando detalladamente los resultados obtenidos en las 4 series de pruebas realizadas podemos concluir lo siguiente:

- La mejor relación entre el Suelo empleado y el Abono adicionado según los datos obtenidos es la de (Suelo 1 – Abono 2), ya que muestra porcentajes de remoción importantes de más del 16% a los 90 días del proceso de biorremediación.
- A los 90 días podemos evidenciar que el porcentaje de TPH ha disminuido de forma significativa, teniendo en cuenta que la muestra que presentaba la menor cantidad de abono adicionada tuvo un porcentaje de remoción de más de la mitad, lo que demuestra que a pequeñas concentraciones también se pueden evidenciar resultados positivos importantes.
- Así como la muestra con menor cantidad de agente remediador mostró resultados positivos, la muestra con la mayor cantidad de abono, relación 2 – 1, tuvo resultados mejores de lo esperado, donde se puede evidenciar que la

muestra que inicialmente tenía un porcentaje de TPH del 30,90% a los 90 días presento un porcentaje de 3,16% que es casi lo estipulado por la norma Louisiana 29B lo que infiere que la metodología es efectiva para llevar a cabo la biorremediación de suelos con cargas contaminantes elevadas, como lo son las que se presentan en las actividades cotidianas de la industria petrolera.

- Como se había expresado anteriormente, la biorremediación es un proceso lento que requiere de un tiempo prolongado para observar resultados favorables, que hicieron necesaria la realización de un nuevo análisis a los 90 días del tratamiento, donde se logró observar resultados superiores, que evidencian que la interacción del abono y el suelo contaminado a mayor número de días tendrá mejores efectos en la remoción, hasta el punto de que los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) hayan disminuido por completo.
- Se recomienda que en el futuro se pueda realizar un análisis de suelos que también sea procedente de un accidente o alguna situación real de la industria, donde se lleven a cabo pruebas a diferentes tiempos, con el fin de evidenciar mejor el proceso de biorremediación y sea posible determinar cantidades y concentraciones optimas del abono, y de igual forma el tiempo al que se logra degradar por completo la carga contaminante.

ANEXO B

FICHA TÉCNICA ABONO ORGÁNICO EMPRESA CEAGRODEX



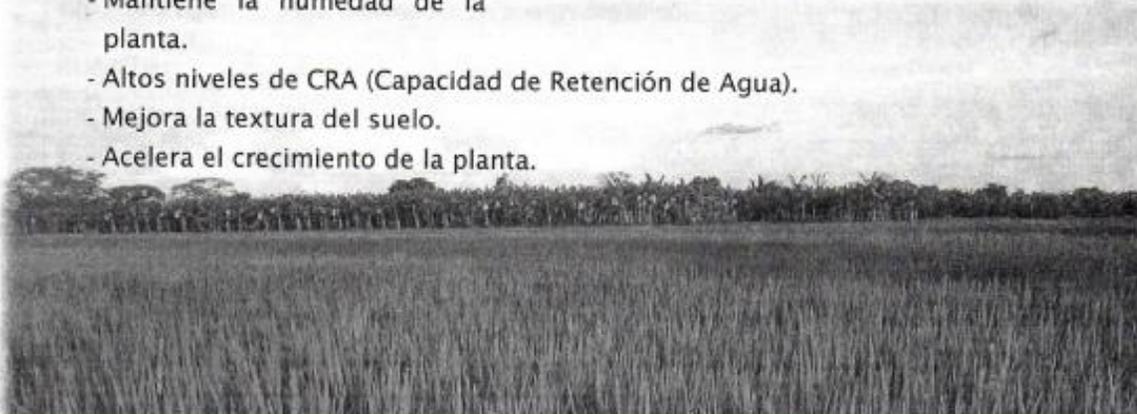
*FERTILIZANTE ORGANICO PARA
APLICACIÓN AL SUELO DE USO
AGRICOLA*



Carbono orgánico oxidable total	27.7 %
Cenizas	41.8 %
CIC (capacidad de intercambio catiónico)	39.8 mEq/100g
Capacidad de retención de humedad	192%
Calcio	2.45%
Nitrógeno orgánico total (N)	2.56 %
Fosforo total (P ₂ O ₅)	2.558%
Potasio total (K ₂ O)	0.517 %
Sodio (Na)	1.056%
Humedad	35.5 %
pH	7.23
Densidad	0.19 g/Cm ³
Metales pesados	Contenido de metales pesados por debajo de los límites establecidos en la norma.
Salmonella spp	Ausente
Enterobacterias	<10ufc/g

CEAGROCOMPOST

- Mantiene la humedad de la planta.
- Altos niveles de CRA (Capacidad de Retención de Agua).
- Mejora la textura del suelo.
- Acelera el crecimiento de la planta.



FICHA TECNICA	 ABONO ORGANICO CEAGRODEX DEL HUILA S.A.
---------------	---

1. INFORMACION GENERAL.

Fabricante: CEAGRODEX DEL HUILA S.A.

Registro de empresa fabricante, formulador y empacador de fertilizantes orgánicos (compost) N° 002816.

El compostaje es el proceso de descomposición aeróbica y térmica de residuos orgánicos a través de poblaciones de microorganismos que existen en los propios residuos y con los obtenidos en caldos microbianos, bajo condiciones controladas, para producir abono orgánico que aplicado al suelo influye de manera favorable en el aspecto Fisicoquímico y biológico.

El abono orgánico se usa para restaurar los niveles de materia orgánica del suelo, con el fin de aumentar la capacidad de retención de nutrientes.

1. IDENTIFICACION DEL PRODUCTO

NOMBRE: CEAGROCOMPOST

PRODUCTO: Acondicionador de suelos orgánico.

FUENTE: Estiércol y contenido ruminal, restos de animal, lodos PTAR, material Vegetal (Restos de podas) cal.

TIPO DE FORMULACION: Polvo mojable.

PRESENTACION: 1kl, 5kl, 25kl, 40kl



CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS

ESTADO FISICO	Solido de granos irregulares	
Humedad	35.5	%
Cenizas	41.1	%
Carbono oxidable	27.0	%
Capacidad de intercambio Cationico.	39.8	ME/100gr
C/N	14.5	
Capacidad de retención de humedad.	192	%
Densidad	0.19	gr/cm ³
pH	7.23	
Nitrógeno Total (N)	1.86	%
Fosforo Total (P ₂ O ₅)	1.701	%
Potasio (K ₂ O)	0.4333	%
Color	Café	
Olor	Amoniaco y a geosminas (olor a tierra fértil).	

ANALISIS MICROBIOLOGICO

Mesofilos Ufc/g	Termófilos Ufc/g	Mohos Ufc/g	Levaduras Ufc/g	Nematodos y/o protozoos	Enterobacterias Ufc/g	Salmonella En 25 gr
1,8E+10	2,1E+11	1,0E+03	0,0E+00	ausentes	0,0E+00	ausente

METALES PESADOS: Cumple norma ICA sobre contenidos máximos.
ENTERO BACTERIAS: Ausentes

MODO DE EMPLEO

Cultivos: este producto se ha probado en pastos, cultivos de arroz, hortalizas y frutales.

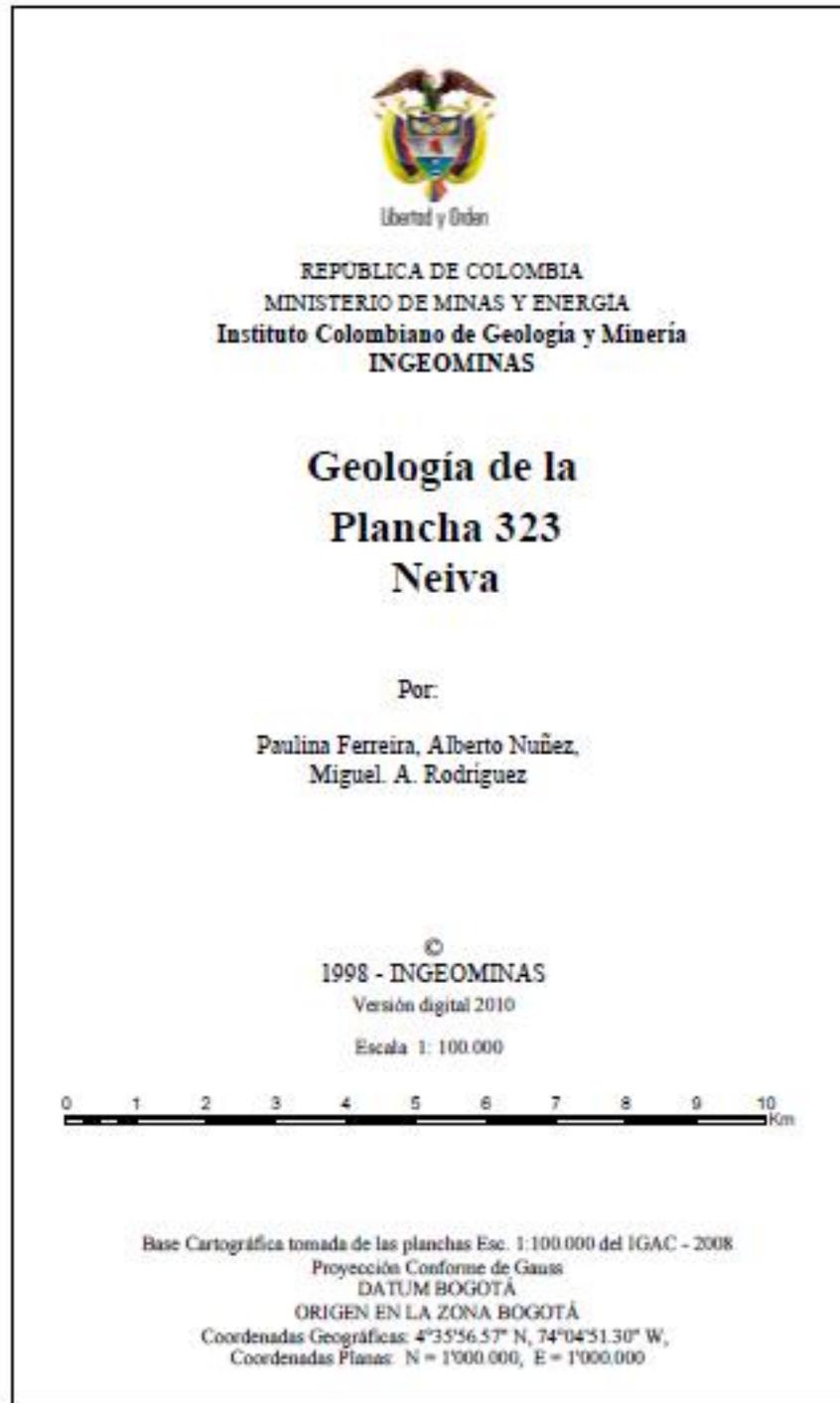
Dosis de empleo recomendada

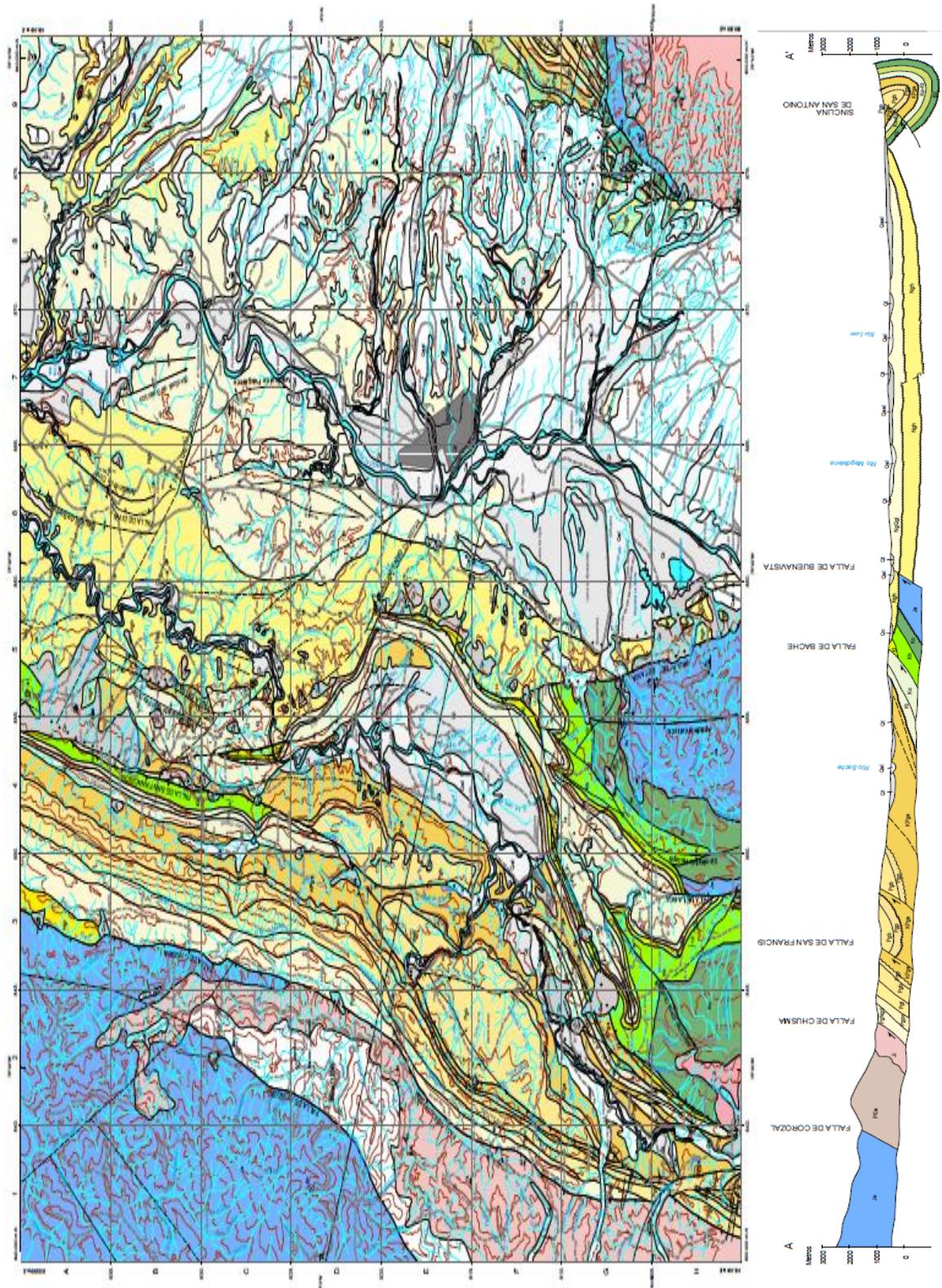
CULTIVO RECOMENDADO	PERIODO O TIEMPO DE GERMINACION	DOSIS
Cilantro	2 semanas	10kl /m ²
zanahoria	3 semanas	10kl /m ²
Tomate	2 semanas	10kl /m ²
Maíz de tuza	1 semana	10kl /m ²
Maíz sorgo	1 semana	10kl /m ²
Melón	1 semana	2.5kl /m ²
patilla	1 semana	2.5kl /m ²
pastos	3 días	9kl/m ²

Carrera 5 N° 81S-45 Tel: 8731568 – 8732434 FAX 8731073 Nit 891 104 681-6

ANEXO C

PLANCHA 323 – NEIVA

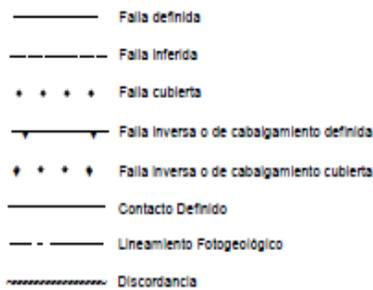




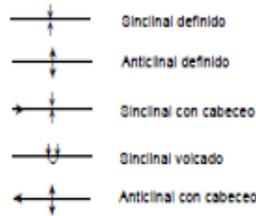
		ROCAS SEDIMENTARIAS	ROCAS IGNEAS	ROCAS METAMÓRFICAS
CENOZOÍCO	CUATERNARIO	<p>Qal Qt Qal: Depósitos aluviales Qt: Terrazas recientes.</p> <p>Qc Qf Qc: Depósitos de pendiente Qf: Depósitos fluvioacústres</p> <p>NgQf SEDIMENTOS DE FORTALECILLAS Depósitos de arenas pumíticas, flujos de escombros y cenizas.</p>		
	NEÓGENO	<p>NgQgi FORMACIÓN GIGANTE Arenas tobáceas y pumíticas blancas azulesas y arcillas grises.</p> <p>Ngn FORMACIÓN NEIVA Gravas polimícticas, arenas grises y arcillas amarillentas y verdozas.</p> <p>Ngh GRUPO HONDA Areniscas grauváquicas de color gris, niveles conglomeráticos de chert negro y arcilolitas roizas.</p> <p>Ngf FORMACIÓN TUNE Lodolitas negras con carbón, areniscas de grano fino.</p>		
PALEOGENO		<p>PgNgd FORMACIÓN DOIMA Intercalaciones de conglomerados de cuarzo lechoso, lílicos metamórficos, areniscas conglomeráticas y lodolitas rojas.</p> <p>Pgpo FORMACIÓN POTRERILLO Areniscas blancas grano grueso a conglomerático con estratificación cruzada y gradada normal separada por capas de lodolitas moteadas por bioturbación.</p> <p>Pgt FORMACIÓN TESALIA Conglomerados de chert negro, aren y cuarzo en capas muy gruesas, estratificación lenticular.</p> <p>Pgb FORMACIÓN BACHÉ Conglomerados de chert negro y pardo, con estratificación cruzada y forma canales, niveles de lodolitas abigarradas, con diferente grado de pedogénesis.</p> <p>Pgp FORMACIÓN PALERMO Conglomerados de guijarros de chert pardo, rojo y lílicos sedimentarios, en capas muy gruesas. En la base areniscas de grano muy grueso a muy fino con estratificación cruzada.</p>		
	CRETÁCICO	<p>KPgs FORMACIÓN SECA Arenisca gris de grano fino a muy fino, separadas por capas medias de lodolitas abigarradas con restos vegetales. En la parte inferior de lodolitas y arcilolitas rojo y púrpura.</p> <p>Kt FORMACIÓN LA TABLA Areniscas cuarzosas, blancas, frías, separadas por láminas medias de lodolitas negras.</p> <p>Ko GRUPO OLINI Paquetes de lillas, lodolitas y fosforitas en la base y el techo, separadas por areniscas cuarzosas de grano muy fino, porosas.</p> <p>Kl FORMACIÓN LOMA GORDA Intercalaciones de lodolitas, calizas arenosas, arenitas, fosforitas y lillas en capas delgadas a medias.</p> <p>Kh FORMACIÓN HONDITA Intercalaciones de lodolitas, lodolitas calcáreas negras, calizas y areniscas de grano muy fino. Conexiones calcáreas mayores de 1m en la parte superior.</p> <p>Kc FORMACIÓN CABALLOS Areniscas de grano grueso con estratificación cruzada, intercalaciones de lodolitas, areniscas y calizas, areniscas cuarzosas ferruginosas, glauconíticas hacia el techo.</p>	<p>Ko-Kt GRUPO OLINI FORMACIÓN LA TABLA Sin diferenciar.</p> <p>Kh-Kl FORMACIONES HONDITA Y LOMAGORDA Sin diferenciar.</p>	
JURÁSICO			<p>Ji Jt Ja Ji: Batolito de Itagut Jt: Cuarzomonzodiorita de Tenuel JR: Monzogranito de Algeciras</p> <p>Js FORMACIÓN SALDAÑA Tobas de ceniza, lapilli y aglomerados de cristales y lílicos, lílicas tobáceas violeta, areniscas tobáceas, gris y verdoza.</p>	



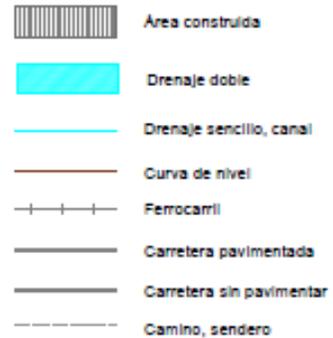
CONTACTOS Y FALLAS



ESTRUCTURAS PLEGADAS



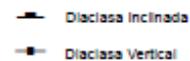
BASE CARTOGRÁFICA



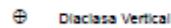
DATOS MEDIDOS EN ROCAS SEDIMENTARIAS



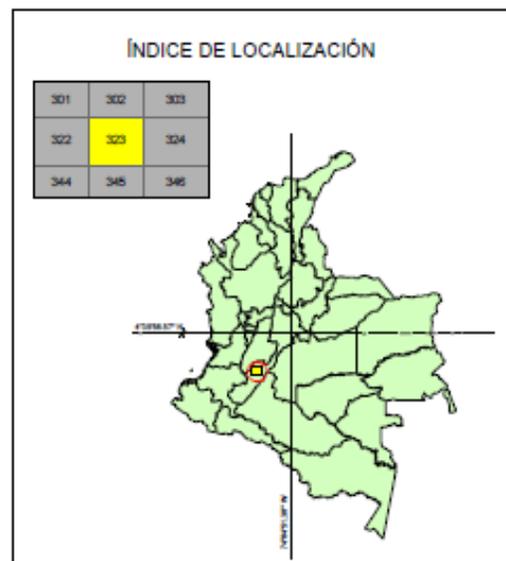
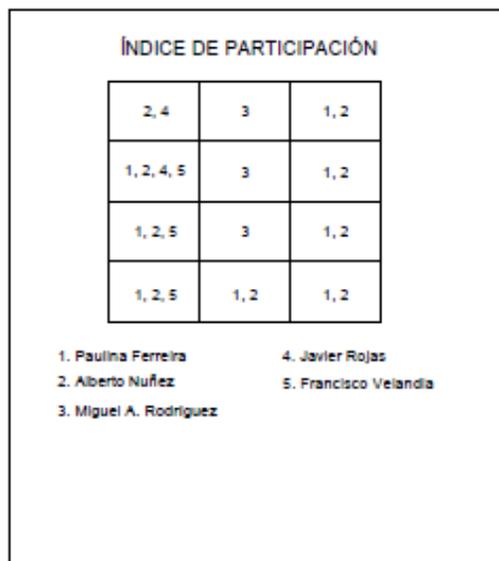
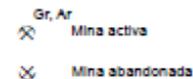
DIACLASAS



DATOS MEDIDOS EN ROCAS METAMÓRFICAS



RECURSOS NATURALES, GEOMORFOLOGÍA Y OTROS



ANEXO D

MÉTODO TOMA DE MUESTRA

PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS PARA EXTRACCIÓN.

Materiales

- Material
- Espátula.
- Mortero.
- Papel aluminio.
- Frascos de vidrio de 30 ml.

Procedimiento

- Recolectar con una pala o espátula una muestra representativa del suelo.
- Almacenarla en un frasco de vidrio de 30 ml y sellarla para impedir su contacto con el ambiente.
- Transportar y conservar la muestra retirada del sol, en un lugar fresco y seco hasta su llegada al laboratorio.
- Poner a secar la muestra (400 gramos de suelo) extendida en un papel aluminio a 30°C, durante 48 horas, en un cuarto de temperatura controlada o a la sombra.
- Moler la muestra en un mortero hasta obtener partículas finas y uniformes.
- Colocar la muestra seca en un frasco seco y limpio.

Pasos para obtener una muestra representativa

- Dividir la zona de acuerdo a la topografía.
- Realizar una cuadrícula del terreno.
- Dentro del mismo lote tome varias muestras, desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 20 cms.
- Tomar 5 muestras al azar o en forma de zig-zag en cada una de las cuadrículas demarcadas.
- Mezclar uniformemente las muestras de cada cuadrícula para obtener una muestra representativa por cuadrícula o sector seleccionado.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE MUESTRA DE SUELO

CLASIFICACIÓN TEXTURAL POR MÉTODO DE BOUYOUCOS

Para realizar el procedimiento se pesan 100g de suelo seco, se pasa a un Erlenmeyer adicionando 10 mL de agua, se deja reposar durante unos minutos y se agita por 2 horas. La suspensión del suelo se vierte en el cilindro de 1000 mL, con agua llevar el nivel hasta la marca inferior del cilindro con el hidrómetro dentro, agitar vigorosamente y sumergir el hidrómetro a los 40 segundos tomar la lectura del hidrómetro y la temperatura, dejamos el recipiente quieto que no se perturbe la solución y pasadas 2 horas se vuelven a tomar las lecturas.

Una vez calculados los porcentajes de las partículas de arcillas, limos y arcillas, procedemos a determinar la textura que presenta la muestra suelo para esto ubicamos cada uno de los porcentajes obtenido en el diagrama de texturas como se muestra en la ilustración 4, el punto donde se cruzan las tres líneas es la textura correspondiente a la muestra analizada.

CLASIFICACIÓN TEXTURAL POR TAMIZADO

Para realizar esta clasificación, se debe seguir el siguiente previo procedimiento:

- El suelo se debe secar en horno.
- Todos los grumos presentes se deben disgregar en partículas pequeñas antes de ser pasados por las mallas esto con el fin de obtener el perfil real del suelo y minimizar los errores en el ensayo,
- Después de disgregados los grumos se toma la muestra y se hace pasar por los tamices, para ello con ayuda de un vibrador con el fin de que exista un margen de error pequeño en el intercambio de las partículas entre los tamices con el fin de que no se quede mucho material retenido en algún tamiz que no le corresponda su respectivo diámetro

Generalmente los resultados por tamizado son expresados como porcentajes del peso total de suelo que ha pasado por las diferentes mallas.

Materiales

- Tamices de tamaños variados

- Taras
- Muestra de suelo
- Tamizador eléctrico (VIBRADOR)
- Cepillos y pinceles para extraer todo el material de los tamices
- Balanza

Procedimiento

- Se toma el peso inicial de la muestra a ensayar.
- Se pesan las taras vacías
- Se forma la columna de los tamices, organizándolos de acuerdo al tamaño de su abertura (en mm) de forma que el primer tamiz sea el de menor abertura.
- Se dispone la columna de tamices en el tamizador eléctrico y se programa su funcionamiento para diez minutos de tamizado.
- Se baja la muestra del tamizador y se separan los tamices con sus respectivos porcentajes de suelo retenido.
- Se deposita el material de cada tamiz en una tara diferente.
- Se toman los pesos de las taras más el suelo respectivo.
- Luego de conocido, la cantidad de material retenido se realiza el cálculo del porcentaje de material que pasas cada tamiz, hasta llegar al tamiz 200 que es aquel que define el límite entre finos y gruesos.

COLOR

El color del suelo es una de las propiedades físicas más representativas y fáciles de interpretar, donde se encuentra una gama de colores que van desde el negro, seguidos por tonos pardos, ocres de tipo ferruginoso, determinando así la presencia de materiales orgánicos (oscuros) hasta mangánicos (ocres).

Color	Propiedad Representativa
Oscuro	Es determinado principalmente por la presencia de materiales orgánicos descompuestos y su intensidad depende del contenido de humedad que el suelo posea.

Rojo	Este color indica buena aireación y drenaje. El color se debe a la presencia de óxidos de fierros no hidratados.
Amarillo	El color amarillo es un indicativo de drenaje deficiente, y se debe a la presencia de hidróxidos de hierro (limonita).
Pardos	Denota presencia de óxidos de hierro en adición a la materia orgánica.
Grises	Su color se debe a la presencia de fracciones minerales como caolinita, yeso, cuarzo y algunos carbonatos. Los colores grises claros y blancuzcos son causados por el material original en suelos litosoles
Verdosos y Azulados	Se presentan principalmente en subsuelos mal drenados y con presencia de minerales como pirita y vivianita.

El color se determina comparando pequeñas cantidades de suelo con placas de colores de la Carta Munsell, las cuales son clasificadas de acuerdo a:

- Hue: Longitud de onda dominante.
- Value: Cantidad de luz, variando entre colores claros y oscuros.
- Chroma: Pureza relativa de la longitud de onda de luz.

Procedimiento:

- Determine el estado de humedad del suelo: Seco, húmedo o mojado y anótelos. El suelo al estar seco es compacto, duro, no se adhiere y no mancha los dedos; por el contrario la aumentar la humedad y ser comprimido en la mano, cambian estas características: Mayor plasticidad, pegajosidad, cohesión, etc. Debe observarse al comprimirlo si alcanza a salir o no agua entre los nudillos de la mano, si sale se estará en el rango de mojado, sino en el de húmedo.
- Coloque el suelo detrás de los círculos (agujeros) presentes en la tabla Munsell y compare el color con los patrones, hasta encontrar el más aproximado.
- Anote el color valiéndose de la nomenclatura de la tabla, anotando primero el matiz, seguidamente el valor (números localizados sobre la parte izquierda vertical) como numerador, y el chroma (localizado en la parte inferior de la tabla), como denominador.

- Anote el equivalente de la clave observando el reverso de la hoja anterior identificada en la misma clave. Queda así definido el color codificado.

DENSIDAD APARENTE

Es la relación entre la masa de las partículas del suelo secas a la estufa y el volumen total, donde se incluye el espacio vacío. La densidad aparente puede ser afectada por el contenido de materiales orgánicos, textura y origen del suelo principalmente.

Método cilindro biselado

Procedimiento:

- Se introduce el cilindro en la porción del suelo que se desea muestrear. Se debe tener precaución de introducir completamente el cilindro y hacerlo de forma que se disturbe lo menos posible la muestra.
- Se retira el cilindro lleno con suelo, se enrasan sus bordes con una navaja, se coloca una bolsa plástica y se sella, para traerlo al laboratorio.
- Se coloca el cilindro con la muestra de suelo a secar en horno a 105 °C, durante 24 horas, al cabo de las cuales se retira el conjunto del horno, se deja enfriar y se pesa (Pt).
- Se retira el suelo del cilindro y se pesa éste (Pc). Además, al cilindro se le toman las medidas de su longitud (h) y de su diámetro interno (d), con las cuales se calcula el volumen de éste.
- Se calcula la densidad aparente mediante la relación entre el peso del suelo seco y el volumen del cilindro.

$$Da = \frac{Ps}{Vt}$$

Da = Densidad aparente.

Ps = Peso del suelo seco.

Vt = Volumen total del suelo seco.

DENSIDAD REAL

Es la relación entre la masa del suelo y el volumen de sólidos. Es decir, no incluye el volumen de espacios vacíos. Los valores de densidad real se ven afectados por los contenidos de materiales piroclásticos y orgánicos. La presencia de materiales orgánicos parece es el factor que más influye en sus valores.

Método del picnómetro

El método del picnómetro es el más empleado para medir la densidad de los sólidos o gravedad específica. Se fundamenta en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido.

Procedimiento:

- Pesar el picnómetro completamente seco.
- Agregar aproximadamente de 2 a 5g de suelo seco a 105°C, el cual debe previamente haber sido tamizado por 2mm.
- Pesar el picnómetro más el suelo seco y por diferencia de pesos con respecto al picnómetro vacío obtenga el peso del suelo.
- Adicionar agua al picnómetro lentamente hasta una tercera parte de su volumen (el agua utilizada debe ser destilada y hervida para eliminar el aire que se encuentra en el suelo).
- Llevar el picnómetro destapado a la campana de vidrio y aplique vacío durante dos horas para eliminar las burbujas de aire; retire el picnómetro de la campana de vacío y agregue agua hasta completar 2/3 del volumen del picnómetro y llevarlo nuevamente al vacío durante una hora.
- Sacar el picnómetro de la campana, llenar con agua, taparlo y pesarlo.
- Secar completamente el picnómetro y pesarlo nuevamente.
- Calcular la densidad real

POROSIDAD

La porosidad constituye una de las características más importantes al definir el valor ecológico de los suelos y aun cuando se hace uso generalizado de los valores de la porosidad total. En estudios de caracterización física del suelo, es conveniente determinar la porosidad de aireación.

La porosidad equivale a la diferencia entre la densidad real y la aparente. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Pt (\%) = 1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) * 100$$

Pt = Porosidad total

Da = Densidad aparente

Dr = Densidad real

HUMEDAD

El agua que un suelo puede almacenar en sus espacios porosos se conoce como capacidad de retención de humedad. Sobre esta agua actúan las fuerzas de adhesión, cohesión y capilar. La interacción de estas fuerzas se conoce como succión del suelo o tensión de humedad del suelo.

Materiales

- Cápsulas taradas para humedad
- Balanza analítica
- Estufa para secado (Horno)
- Espátula
- Suelo

Procedimiento

- Pesar las cápsulas de humedad solas.
- Pesar el suelo (húmedo) que se va a introducir en las cápsulas de humedad.
- Pesar las cápsulas de humedad con el suelo húmedo.
- Llevar a la estufa la cápsula con la muestra de suelo previamente pesada para secarla hasta obtener un peso constante a la temperatura de 105 °C.
- Apagar la estufa, tapar la cápsula, sacarla de la estufa y dejarla enfriar en un desecador.
- Realizar el cálculo.

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{W_{sh} - W_{ss}}{W_{ss}} \right) * 100$$

Wsh = Peso suelo húmedo

Wss = Peso suelo seco

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE MUESTRA DE SUELO

pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H⁺) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.

Materiales y equipo

- Muestra de suelo.
- Balanza analítica.
- Vasos de precipitado de 50 ml.
- Pipeta de 10 ml.
- Pipeta con agua destilada.
- Potenciómetro.
- Agua destilada.
- Solución amortiguadora de pH 7 y 4.
- Agitadores magnéticos.

Procedimiento

- Pesar 20 gramos de suelo y colocarlo en un vaso de precipitado de 50 ml.
- Agregar 20 ml de agua destilada.
- Agitar y dejar reposar 10 minutos.
- Ajustar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras.
- Pasados los 10 minutos, medir el pH con el potenciómetro.

CONDUCTIVIDAD

Material y equipo

- Muestra de suelo seco y molida en un mortero.

- Balanza analítica.
- Vaso de precipitado de 100 ml.
- Bureta.
- Papel filtro.
- Conductímetro.
- Frascos.
- Agua destilada.

Procedimiento

- Pesar 20 g de suelo seco y colocarlo en un recipiente de plástico.
- Agregar 20 mL de agua destilada con la bureta y mezclar.
- Colocar papel filtro sobre el embudo, humedecerlo con agua destilada, dejando drenar el exceso.
- Obtener un extracto.
- Calibrar el conductímetro. Antes de usar el medidor de conductividad debe calibrarse con una solución estándar.
- Leer la conductividad eléctrica.