



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, Marzo del 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

DIEGO ALEJANDRO CHAMORRO MENDEZ, con C.C. No. 1075286516,

JUAN CARLOS TOBAR MUÑOZ, con C.C. No. 1082773515,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

Titulado EVALUACIÓN TECNICA ECONOMICA PARA AREA DE LANDFARMING CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX

Presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de

INGENIERO DE PETROLEOS;

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.

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.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://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.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: Diego A. Chamorro M.

Firma: Juan Carlos Adv. G.



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Evaluación Técnica Económica Para Área De Landfarming Contaminada Con Un Crudo Pesado, Usando Abono Ceagrodex

**AUTOR O AUTORES:**

| Primero y Segundo Apellido | Primero y Segundo Nombre |
|----------------------------|--------------------------|
| Chamorro Méndez            | Diego Alejandro          |
| Tobar Muñoz                | Juan Carlos              |

**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 Petroleos

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería De Petroleos

**CIUDAD:** Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2018 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 110

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas\_\_\_ Fotografías X Grabaciones en discos\_\_\_ Ilustraciones en general X  
Grabados\_\_\_ Láminas\_\_\_ Litografías\_\_\_ Mapas\_\_\_ Música impresa\_\_\_ Planos\_\_\_  
Retratos\_\_\_ Sin ilustraciones\_\_\_ Tablas o Cuadros X

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

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://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.



**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN:**

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

| <u>Español</u>                       | <u>Inglés</u>                |
|--------------------------------------|------------------------------|
| 1. Biorremediación                   | Bioremediation               |
| 2. Landfarming                       | Landfarming                  |
| 3. Contaminación de suelos           | Oil-Contaminated Soils       |
| 4. Hidrocarburos Totales de petroleo | Total Petroleum Hydrocarbons |

**RESUMEN DEL CONTENIDO:**

En la industria petrolera es común encontrarse con eventos de contaminación de suelos con hidrocarburo debido a diferentes situaciones, ya sean accidentales u operativas. Estos episodios generan afectación para el medio ambiente y los seres humanos.

La finalidad de este proyecto es promover la utilización de un abono 100% natural en un proceso de biorremediación en las zonas donde se presentan episodios de contaminación. Esto con el fin de concientizar y promover el cuidado al medio ambiente, pues es una responsabilidad de todos y más para los ingenieros de petróleo.

El abono de la empresa Ceagrodex ha sido utilizado en previas investigaciones en laboratorio arrojando resultados favorables como biorremediador de suelo contaminado con hidrocarburos. El proceso se desarrolló sobre un montaje experimental compuesto de 12 eras de un mismo suelo contaminadas con crudo pesado del campo Tello a diferentes concentraciones y controlando dos rangos de pH. Finalmente se realizaron pruebas de TPH a determinados rangos de tiempo para poder evaluar la favorabilidad del biorremediador con estos volúmenes de suelo y a estas condiciones establecidas, terminando con una evaluación económica general.



## ABSTRACT:

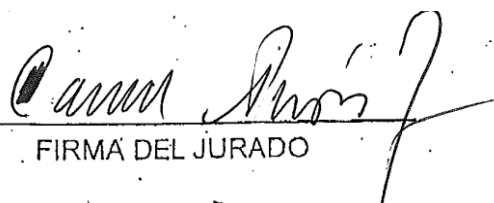
In the oil industry it is common to find events of contamination of soils with hydrocarbons due to different situations, whether accidental or operational. These episodes generate affectation for the environment and human beings.

The purpose of this project is to promote the use of a 100% natural fertilizer in a bioremediation process in the areas where the aforementioned episodes of contamination occur. This in order to raise awareness and promote care for the environment, it is a responsibility of all and more for oil engineers.

This fertilizer from the company Ceagrodex has been used in previous laboratory investigations, yielding favorable results as a bioremediator of soil contaminated with hydrocarbons. The process was developed on an experimental assembly composed of 12 eras of the same soil contaminated with heavy crude oil from the Tello field at different concentrations and controlling two pH ranges. Finally, TPH tests were carried out at certain time ranges in order to evaluate the bioremediator's favorability with these soil volumes and these established conditions, ending with a general economic evaluation.

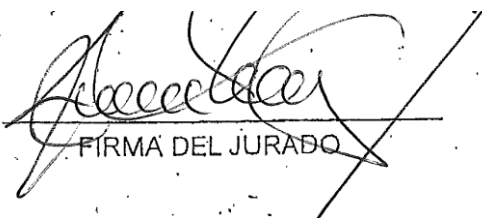
## APROBACION DE LA TESIS

**Nombre Jurado:** Carmen Pinzón



FIRMA DEL JURADO

**Nombre Jurado:** Jaime Rojas



FIRMA DEL JURADO



**EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA ÁREA DE LANDFARMING  
CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS**  
**NEIVA**  
**2018**



**EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA ÁREA DE LANDFARMING  
CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX**

**DIEGO ALEJANDRO CHAMORRO MENDEZ**

**JUAN CARLOS TOBAR MUÑOZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingenieros de Petróleos**

**Director.**

**Ms. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS**

**Ingeniera de Petróleos**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS**

**NEIVA**

**2018**

**EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA ÁREA DE LANDFARMING  
CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX**

**LINEA DE INVESTIGACIÓN: Recursos Naturales y Medio Ambiente.**

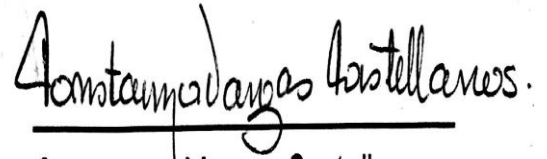
**ÁREA DE INVESTIGACIÓN: Biorremediación**

**SEMILLERO DE INVESTIGACION: Operations, Process, Hydrocarbons,  
Energy And Environment- OPHEEN**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN: Geosciences, Infrastructure, Productivity  
Environment- GIPE**

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

**Director:**

  
Constantino Vargas Castellanos

**Jurado:**

  
CARMEN PINZÓN TORRES

**Jurado:**

  
JAIME ROJÁS PUENTES



## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco primero a Dios por bendecirme cada día, por brindarme todo lo que necesito y más, por guiarme siempre en cada paso que doy. Luego a mi familia por ser el motor de mi vida, por su apoyo incondicional y sus palabras sabias en los momentos necesarios, sin ellos nada de esto sería posible. Gracias también a mi directora Constanza por la colaboración con el proyecto y a mis compañeros de carrera pues fueron parte importante durante todo este proceso.*

### **DIEGO ALEJANDRO CHAMORRO MENDEZ**

*En primer lugar quiero agradecerle a Dios por permitirme culminar una etapa más en mi vida, luego agradecer a mi madre quien fue el motor que me impulso para que hoy este logrando cumplir este sueño; a mis familiares que estuvieron pendientes de mí en este largo proceso. También dar gracias a la Universidad Surcolombiana que fue mi casa durante este tiempo, agradecer igualmente a la profesora Constanza quien me apoyo incondicionalmente durante este proyecto y a cada uno de los profesores.*

### **JUAN CARLOS TOBAR MUÑOZ**

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA ÁREA DE LANDFARMING CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX.

**AUTORES:** Diego Alejandro Chamorro Méndez / Juan Carlos Tobar Muñoz.

**PALABRAS CLAVE:** Biorremediación, Contaminación de suelos, landfarming, Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).

### DESCRIPCION:

En la industria petrolera es común encontrarse con eventos de contaminación de suelos con hidrocarburo debido a diferentes situaciones, ya sean accidentales u operativas. Estos episodios generan afectación para el medio ambiente y los seres humanos.

La finalidad de este proyecto es promover la utilización de un abono 100% natural en un proceso de biorremediación en las zonas donde se presentan episodios de contaminación. Esto con el fin de concientizar y promover el cuidado al medio ambiente, pues es una responsabilidad de todos y más para los ingenieros de petróleo.

El abono de la empresa Ceagrodex ha sido utilizado en previas investigaciones en laboratorio arrojando resultados favorables como biorremediador de suelo contaminado con hidrocarburos. El proceso se desarrolló sobre un montaje experimental compuesto de 12 eras de un mismo suelo contaminadas con crudo pesado del campo Tello a diferentes concentraciones y controlando dos rangos de pH. Finalmente se realizaron pruebas de TPH a determinados rangos de tiempo para poder evaluar la favorabilidad del biorremediador con estos volúmenes de suelo y a estas condiciones establecidas, terminando con una evaluación económica general.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** ECONOMIC TECHNICAL EVALUATION FOR LANDFARMING AREA CONTAMINATED WITH HEAVY OIL, USING CEAGRODEX FERTILIZER.

**AUTHORS:** Diego Alejandro Chamorro Méndez / Juan Carlos Tobar Muñoz.

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

## **DESCRIPTION:**

In the oil industry it is common to find events of contamination of soils with hydrocarbons due to different situations, whether accidental or operational. These episodes generate affectation for the environment and human beings.

The purpose of this project is to promote the use of a 100% natural fertilizer in a bioremediation process in the areas where the aforementioned episodes of contamination occur. This in order to raise awareness and promote care for the environment, it is a responsibility of all and more for oil engineers.

This fertilizer from the company CeagroDEX has been used in previous laboratory investigations, yielding favorable results as a bioremediator of soil contaminated with hydrocarbons. The process was developed on an experimental assembly composed of 12 eras of the same soil contaminated with heavy crude oil from the Tello field at different concentrations and controlling two pH ranges. Finally, TPH tests were carried out at certain time ranges in order to evaluate the bioremediator's favorability with these soil volumes and these established conditions, ending with a general economic evaluation.

## FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la industria petrolera es común encontrarse con accidentes, fallas operacionales, humanas y/o catástrofes naturales que llevan al derrame de crudo y por consiguiente a una contaminación del medio ambiente, estas contaminaciones pueden llegar a considerarse la muerte de una zona natural si no son intervenidas de manera oportuna y eficaz.

Los procesos de biorremediación son una herramienta fundamental al tratar suelos contaminados con hidrocarburos, por medio de los cuales se busca el retorno del suelo a condiciones ambientalmente favorables en el menor tiempo posible y al menor costo, empleando insumos de fácil consecución.

Se busca una alternativa práctica, eficiente y económicamente favorable, a través del uso del abono 100% orgánico producido por la empresa CEAGRODEX como agente biorremediador, en suelos contaminados con hidrocarburos, manejados en áreas de Landfarming en ambientes con parámetros controlados.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el nivel de atención y de control que se tiene con el medio ambiente, más exactamente con los factores o situaciones que puedan dañarlo o afectarlo de manera parcial o total. Este hecho también ha logrado iniciar una campaña masiva de concientización y entendimiento sobre la importancia y la necesidad para el ser humano de convivir amigablemente con su hábitat.

Los hidrocarburos al entrar en contacto con el suelo o el agua, pueden generar afectación ambiental en corto y mediano plazo, debido a que sus componentes no son solubles ni se adaptan a estas zonas, por el contrario generan un cambio en las propiedades físicas del lugar.

El abono natural de la empresa Ceagrodex se utiliza como material biorremediador porque cuenta con una carga de materiales orgánicos con múltiples nutrientes capaces de remediar y mejorar la calidad del suelo afectado, también debido a la carga bacteriana que posee gracias a los componentes con los que fue creado, lo que significa un agente idóneo para la degradación de los hidrocarburos en partículas más simples.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) de suelos contaminados con hidrocarburos, manejados a través de landfarming y definir la viabilidad económica del proyecto de biorremediación.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un proceso y un montaje experimental para eras de landfarming, teniendo control sobre el pH para una mezcla de suelo-abono-hidrocarburos.
- Realizar una valoración de eficiencia al proceso de landfarming usando abono CEAGRODEX.
- Evaluar la favorabilidad económica de un proceso de landfarming teniendo en cuenta todos los aspectos necesarios en el tratamiento.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| 1. GENERALIDADES.....  | 17 |
| 1.1 INDUSTRIA PETROLERA.....   | 17 |
| 1.2 IMPACTOS AMBIENTALES .....   | 18 |
| 1.3 ANTECEDENTES.....  | 18 |
| 2. MARCO TEÓRICO .....   | 21 |
| 2.1 SUELO.....   | 21 |
| 2.2 COMPOSICIÓN DEL SUELO .....  | 22 |
| 2.2.1 Perfil del suelo .....   | 22 |
| 2.2.2 Textura del suelo.....   | 23 |
| 2.3 HIDROCARBUROS.....   | 24 |
| 2.3.1 Química de los hidrocarburos.....  | 25 |
| 2.3.1.1 Hidrocarburos alifáticos.....  | 26 |
| 2.3.1.2 Hidrocarburos aromáticos.....  | 26 |
| 2.3.1.3 Resinas y Asfaltenos .....   | 27 |
| 2.4 HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO (TPH).....   | 28 |
| 2.5 BIORREMEDIACIÓN.....   | 28 |
| 2.5.1 Biorremediación en suelos.....   | 29 |
| 2.5.2 Principales factores que afectan la biorremediación.....                           | 30 |
| 2.5.3 Métodos de biorremediación en suelos.....  | 31 |
| 2.5.4 Landfarming.....   | 33 |
| 2.5.4.1 Equipos y requerimientos del terreno .....                                       | 34 |
| 2.5.4.2 Pasos para realizar la técnica de landfarming para biorremediación de suelos. 35 |    |
| 2.5.4.3 Factores y limitaciones a considerar en el landfarming .....                     | 35 |
| 2.5.4.4 Ventajas del landfarming .....   | 36 |
| 2.5.4.5 Desventajas del landfarming .....  | 36 |
| 2.5.5 Biorremediación de hidrocarburos en suelos.....                                    | 36 |
| 2.5.6 Biorremediación para disminuir niveles de TPH en suelos.....                       | 37 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.6   | ABONO ORGÁNICO CEAGRODEX.....   | 37 |
| 2.6.1 | Proceso de fabricación .....  | 37 |
| 2.6.2 | Composición.....  | 38 |
| 2.6.3 | Análisis microbiológico .....   | 39 |
| 2.6.4 | Beneficios del abono Ceagrodex.....                                     | 39 |
| 2.6.5 | Influencia del abono en biorremediación de hidrocarburos.....           | 39 |
| 2.7   | DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS .....                                      | 40 |
| 2.7.1 | Degradación microbiana de hidrocarburos .....                           | 40 |
| 2.7.2 | Factores que condicionan la biodegradación de hidrocarburos.....        | 41 |
| 2.7.3 | Degradación de hidrocarburos alifáticos en procesos aeróbicos.....      | 42 |
| 2.7.4 | Degradación de hidrocarburos aromáticos en ambientes aeróbicos.....     | 43 |
| 2.8   | LEGISLACIÓN AMBIENTAL.....  | 43 |
| 2.8.1 | Legislación ambiental en Colombia .....                                 | 44 |
| 3.    | ÁREA DE ESTUDIO .....   | 49 |
| 3.1   | LOCALIZACIÓN Y GEOLOGÍA DE ZONA DE TRATAMIENTO .....                    | 49 |
| 3.2   | PLANCHA 323-NEIVA .....   | 51 |
| 3.2.1 | Estratigrafía de la zona de estudio .....                               | 53 |
| 4.    | MARCO EXPERIMENTAL .....  | 54 |
| 4.1   | RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL SUELO DE LA ZONA PARA TRATAMIENTO.....    | 54 |
| 4.2   | ADECUACIÓN DEL TERRENO PARA LA PLANTA PILOTO DE LANDFARMING .....       | 54 |
| 4.3   | OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO..... | 56 |
| 4.4   | CARACTERIZACIÓN DEL SUELO RECOLECTADO .....                             | 56 |
| 4.4.1 | RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS AL SUELO .....                     | 57 |
| 4.5   | MÉTODO DE EVALUACIÓN DE TPH .....                                       | 57 |
| 4.5.1 | Método gravimétrico modificado (extracción con solvente) .....          | 57 |
| 4.6   | DISEÑO Y MONTAJE EXPERIMENTAL .....                                     | 58 |
| 4.6.1 | Planta piloto de landfarming .....                                      | 58 |



|   |    |
|---|----|
| 5. RESULTADOS.....  | 60 |
| 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL HIDROCARBURO .....  | 60 |
| 5.2 CÁLCULOS PREVIOS A LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ERAS .....  | 60 |
| 5.2.1 Distribución de las eras .....  | 60 |
| 5.2.2 Cálculos de cantidad de contaminante .....  | 61 |
| 5.3 CÁLCULO DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO (TPH)<br>PARA CADA ERA EN LOS DIFERENTES TIEMPOS SEÑALADOS ..... | 62 |
| 5.3.1 Pruebas a tiempo 0 realizadas a las eras de landfarming .....   | 62 |
| 5.3.2 Prueba a tiempo t=15 realizada a las eras de landfarming .....  | 64 |
| 5.3.3 Prueba a tiempo t=30 realizada a las eras de landfarming .....  | 65 |
| 5.3.4 Prueba a tiempo t=45 realizada a las eras de landfarming .....  | 66 |
| 5.3.5 Prueba a tiempo t=60 realizada a las eras de landfarming .....  | 67 |
| 5.3.6 Prueba a tiempo t=75 realizada a las eras de landfarming .....  | 68 |
| 5.3.7 Prueba a tiempo t=90 realizada a las eras de landfarming .....  | 69 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....  | 70 |
| 6.1 ANÁLISIS DE LAS ERAS .....  | 70 |
| 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....  | 83 |
| 7.1 EMPRESAS COLOMBIANAS QUE REALIZAN PROCESOS DE<br>BIORREMEDIACIÓN.....   | 83 |
| 7.2 EMPRESAS COLOMBIANAS QUE COMERCIALIZAN<br>BIORREMEDIADORES.....   | 84 |
| 7.3 COMPARACIÓN DEL PROCESO CONTRA TECNICAS USADAS<br>COMUNMENTE EN LA INDUSTRIA .....                            | 85 |
| 8. CONCLUSIONES .....   | 88 |
| 9. RECOMENDACIONES .....  | 89 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA.....   | 90 |
| ANEXO A.....  | 98 |
| CLASIFICACIÓN TEXTURAL USANDO MÉTODO DE BOUYOUCOS.....  | 98 |
| ANÁLISIS MECÁNICO DEL SUELO TAMIZADO .....  | 98 |
| COLOR.....  | 99 |
| DENSIDAD DEL SUELO .....  | 99 |

|  |     |
|--|-----|
| POROSIDAD .....  | 100 |
| HUMEDAD .....  | 100 |
| pH.....  | 100 |
| MÉTODO DE EVALUACIÓN DE TPH.....   | 101 |
| DISEÑO Y MONTAJE EXPERIMENTAL.....   | 102 |
| OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO A UTILIZAR EN EL<br>TRATAMIENTO..... | 102 |
| ANEXO B.....   | 103 |
| CLASIFICACIÓN TEXTURAL USANDO MÉTODO DE BOUYOUCOS.....                     | 104 |
| ANÁLISIS MECÁNICO DEL SUELO TAMIZADO.....                                  | 104 |
| COLOR.....   | 105 |
| DENSIDAD DEL SUELO .....   | 106 |
| - Densidad aparente.....   | 106 |
| - Densidad real.....   | 107 |
| POROSIDAD .....  | 108 |
| HUMEDAD .....  | 108 |
| pH.....  | 109 |
| Método gravimétrico modificado (extracción con solvente).....              | 109 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1: Horizontes del suelo .....                                     | 23 |
| Ilustración 2: Diagrama triangular para determinar la textura del suelo ..... | 23 |
| Ilustración 3: Estructuras químicas de diferentes componentes del crudo ..... | 27 |
| Ilustración 4: Zona de landfarming .....                                      | 34 |
| Ilustración 5: Ubicación de la planta piloto de landfarming.....              | 50 |
| Ilustración 6: Localización Plancha 323 – Neiva .....                         | 51 |
| Ilustración 7: Geología Plancha 323 – Neiva .....                             | 52 |
| Ilustración 8: Terreno inicial de la planta piloto de Landfarming.....        | 55 |
| Ilustración 9: Terreno final de la planta piloto de Landfarming .....         | 55 |
| Ilustración 10: Terreno final de la planta piloto de Landfarming .....        | 55 |
| Ilustración 11: Terreno de planta piloto de landfarming.....                  | 58 |
| Ilustración 12: Terreno de planta piloto de landfarming.....                  | 59 |
| Ilustración 13: Distribución de las eras en el terreno.....                   | 59 |
| Ilustración 14: Sistema de drenaje para lixiviados. ....                      | 59 |
| Ilustración 15: Montaje para realizar tamizaje .....                          | 98 |
| Ilustración 16: Carta Munsell.....  | 99 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1: Clasificación de las partículas del suelo.....   | 24  |
| Tabla 2: Composición de fracciones químicas de hidrocarburos. ....  | 25  |
| Tabla 3: Ventajas y desventajas de la biorremediación .....   | 30  |
| Tabla 4: Parámetros a considerar y rangos óptimos durante un proceso de<br>Landfarming para tratamiento de suelos contaminados..... | 35  |
| Tabla 5: Ficha técnica general de abono Ceagrodex.....  | 38  |
| Tabla 6: Microorganismos presentes en abono de Ceagrodex.....   | 39  |
| Tabla 7: Datos del crudo de campo Tello.....  | 56  |
| Tabla 8: Características del suelo utilizado en el proceso .....  | 57  |
| Tabla 9: Distribución de las eras. ....   | 60  |
| Tabla 10: Resultados de la prueba a t=0 .....   | 62  |
| Tabla 11: Resultados de la prueba de %TPH en dilución .....   | 63  |
| Tabla 12: Resultados de la prueba a t=15 .....  | 64  |
| Tabla 13: Resultados de la prueba a t=30 .....  | 65  |
| Tabla 14: Resultados de la prueba a t=45 .....  | 66  |
| Tabla 15: Resultados de la prueba a t=60 .....  | 67  |
| Tabla 16: Resultados de la prueba a t=75 .....  | 68  |
| Tabla 17: Resultados de la prueba a t=90 .....  | 69  |
| Tabla 18: Eficiencia de remoción en cada era .....  | 82  |
| Tabla 19: Presentaciones y precios de productos.....  | 84  |
| Tabla 20: Valores finales para el proyecto .....  | 84  |
| Tabla 21: Clasificación del suelo según su porosidad.....   | 100 |
| Tabla 22: Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH.....   | 101 |

## LISTA DE GRAFICAS

|   |    |
|---|----|
| Grafica 1: Relación abono-suelo-hidrocarburos (g).....                    | 70 |
| Gráfica 2: Variación del % TPH en dilución .....                          | 71 |
| Gráfica 3: Variación del % TPH a t=15 .....                               | 72 |
| Gráfica 4: Variación del %TPH a t=30 .....                                | 73 |
| Gráfica 5: Variación del %TPH a t=45.....                                 | 74 |
| Gráfica 6: Variación del %TPH a t=60.....                                 | 75 |
| Gráfica 7: Variación del %TPH a t=75.....                                 | 75 |
| Gráfica 8: Variación del %TPH a t=90.....                                 | 76 |
| Gráfica 9: Variación del %TPH para cada era.....                          | 77 |
| Gráfica 10: Variación del %TPH en eras con carga contaminante de 3%.....  | 78 |
| Gráfica 11: Variación del %TPH en eras con carga contaminante de 5%.....  | 78 |
| Gráfica 12: Variación del %TPH en eras con carga contaminante de 10%..... | 79 |
| Gráfica 13: Variación de TPH en eras con carga contaminante de 3% .....   | 79 |
| Gráfica 14: Variación de TPH en eras con carga contaminante 5%.....       | 80 |
| Gráfica 15: Variación de TPH en eras con carga contaminante de 10% .....  | 80 |
| Gráfica 16: Variación del % TPH respecto a la norma Louisina 29B.....     | 81 |

## 1. GENERALIDADES

### 10.1 INDUSTRIA PETROLERA

El petróleo es un compuesto líquido que se genera de forma natural y se encuentra en formaciones rocosas. Está compuesto por una mezcla de hidrocarburos de varios pesos moleculares, además de otros compuestos orgánicos. El petróleo se produce a partir de los restos de plantas y animales fosilizados luego de exponerse al calor y presión en la capa terrestre durante cientos de millones de años (Alexander M. , Biodegradation and bioremediation, 1999). Con el paso del tiempo, los residuos descompuestos fueron cubiertos por capas de lodo y sedimentos, hundiéndolo en la tierra y conservándolo allí entre capas calientes y presurizadas que fueron gradualmente transformándose en almacenes naturales (Cursi & Calleja, 2000).

La industria del petróleo incluye procesos globales de exploración, extracción, refinamiento, transporte y comercialización de productos derivados. Los productos con mayor volumen en la industria son la gasolina y demás combustibles.

El petróleo es materia prima de muchos productos químicos incluyendo disolventes, pesticidas, fertilizantes, plásticos y farmacéuticos. Además se define como la fuente de energía 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% (Vasallo & Herrera, 2002).

La industria petrolera usualmente se divide en tres fases:

"Upstream": Exploración y producción.

"Midstream": Transporte, procesos y almacenamiento.

"Downstream": Refino, venta y distribución.

## 10.2 IMPACTOS AMBIENTALES

La contaminación por petróleo se produce por su liberación accidental o intencionada en el ambiente, provocando efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio, directa o indirectamente. La contaminación involucra todas las operaciones relacionadas con la explotación y transporte de hidrocarburos, que conducen inevitablemente al deterioro del ambiente. Afecta en forma directa al suelo, agua, aire, y a la fauna y la flora.

Los efectos sobre el suelo se presentan en el momento de realizar desmalezado y alisado del terreno, también al desplazamiento y operación de equipos pesados. Por otro lado los derrames de petróleo o de desechos producen una alteración del sustrato original en que se implantan las especies vegetales dejando suelos que no servirán durante años (Vasallo & Herrera, 2002).

Con respecto a los efectos en el agua superficial el vertido de petróleo produce disminución del contenido de oxígeno, aporta sólidos y sustancias orgánicas e inorgánicas al hábitat. En el caso de las aguas subterráneas, el problema más grande es el aumento de la salinidad, por contaminación de las capas con el agua de producción (Alexander M. , Biodegradation and bioremediation, 1999).

Los efectos sobre el aire se presentan cuando se extrae hidrocarburo líquido con trazas de gas. La recolección del gas está determinada por la relación gas/petróleo, si este valor es alto, el gas es recolectado y si es bajo, es venteado y/o quemado por medio de teas o antorchas. El gas natural está formado por hidrocarburos livianos y puede contener dióxido de carbono, monóxido de carbono y ácido sulfhídrico. Si el gas que se produce contiene estos gases, se quema. Por el contrario si el gas producido es dióxido de carbono, se ventea.

## 10.3 ANTECEDENTES

Previo a la realización de este trabajo de grado se hizo una búsqueda general sobre los estudios o investigaciones en el área de la biorremediación, las diferentes acciones y procedimientos que se han llevado a cabo para atender derrames y/o accidentes ocurridos en las diferentes zonas de trabajo de la industria.

Se estudiaron diferentes sucesos a nivel local, nacional e internacional utilizando los más relevantes, novedosos e innovadores y con la mayor tasa de efectividad.

A continuación se mencionarán algunos de ellos:

- 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 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 midió la eficiencia de remoción de TPH presentado en muestras de suelo impregnadas de diesel empleando abono elaborado en base solo materia orgánica.
- 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, Marina Nicolova, Irena Spasova, Plamen Georgiev y Stoyan Groudev de la Universidad 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 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.
- En 2015 Juan Yaguara y Luis García realizaron el estudio “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”.



- En 2017 Carol Denisse Bermeo C. y Laura María Pérez llevaron a cabo el proyecto “Variación porcentual de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados mediante el uso de abono 100% orgánico”.
- También en 2017 Vargas, C. presentó el proyecto “Evaluación técnica ambiental de la utilización del aceite de higuera en la formulación de un lodo base aceite” en el cual se utilizó humus y se realizó también una valoración de TPH bajo la técnica modificada.

Estos últimos fueron base fundamental para la realización de esta investigación y el proyecto experimental.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 SUELO

Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento (Food And Agriculture Organization of the United Nations; 2001). El suelo se compone de minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo.

Son varios los procesos que pueden contribuir a formar un suelo, algunos de estos son: la deposición eólica, sedimentación en cursos de agua, meteorización, y deposición de material orgánico (Crespo Villalaz, 2004).

La formación del suelo es un proceso muy lento, se necesitan cientos de años para que el suelo alcance el espesor mínimo necesario para la mayoría de los cultivos.

- Al inicio, los cambios de temperatura y el agua empiezan a romper las rocas: el calor del sol las agrieta, el agua se filtra entre las grietas y con el frío de la noche se congela. El hielo ocupa más lugar que el agua, y esto hace que las rocas reciban mayor presión y se rompan. Poco a poco se pulverizan y son arrastradas por las lluvias y el viento. Cuando la superficie es en pendiente, este sedimento se deposita en las zonas bajas. (Food And Agriculture Organization of the United Nations; 2001)
- Seguido a esto aparecen las pequeñas plantas y musgos que crecen metiendo sus raíces entre las grietas. Cuando mueren y se pudren ingresa al suelo materia orgánica que es ácida y ayuda a corroer las piedras (Food And Agriculture Organization of the United Nations; 2001).
- Se multiplican los pequeños organismos (lombrices, insectos, hongos, bacterias) que transforman la vegetación y los animales que mueren, recuperando minerales que enriquecen el suelo. Este suelo enriquecido, tiene mejor estructura y mayor porosidad. Permite que crezcan plantas más grandes, que producen sombra y dan protección y alimento a una variedad mayor aún de plantas y animales (Food And Agriculture Organization of the United Nations; 2001).

## 2.2 COMPOSICIÓN DEL SUELO

La matriz de un suelo está compuesta por cinco componentes principales:

- **Minerales.** Los materiales minerales constituyen los principales componentes estructurales de los suelos y suponen más del 50% del volumen total (Alexander M. , Biodegradation and bioremediation, 1999).
- **Aire – agua.** Conjuntamente constituyen el volumen de poros que por lo general, ocupa entre el 25 y 50% del volumen total. La proporción aire – agua varía considerablemente con la humedad del suelo (Alexander M. , Biodegradation and bioremediation, 1999).
- **Organismos vivos.** Ocupan menos del 1% del volumen.
- **Materia orgánica.** Oscilan entre el 3 y 6% del volumen.

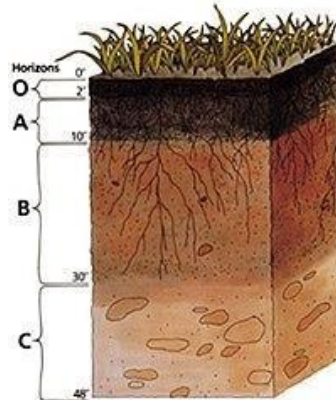
### 2.2.1 Perfil del suelo.

Entre las características del suelo hay una en común para todas, la aparición de una serie de capas (horizontes) desde la superficie hacia abajo; esta serie de capas u horizontes se denomina perfil del suelo (Alexander M. , Biodegradation and Bioremediation, 1999).

En la mayoría de suelos se distinguen tres horizontes principales, como se puede observar en la ilustración 1, los mismos que desde arriba hacia abajo son:

- **Horizonte A:** conocido también como zona de lavado vertical, es la capa más superficial en donde la actividad de las plantas y animales es mayor, su color es oscuro debido a la abundancia de materia orgánica (humus), razón por la cual está sujeta a lixiviación (Jaramillo, 1989) (Jaramillo D. , 2002).
- **Horizonte B:** conocido como zona de precipitado, en este horizonte se encuentran las raíces más profundas de los árboles y arbustos, carece de humus, su color es más claro, y en él se depositan materiales arrastrados desde arriba entre los cuales están materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos metálicos (Jaramillo J. , 1989) (Jaramillo D. , 2002).
- **Horizonte C:** o subsuelo, formado por rocas más o menos alteradas, que sirven de soporte a los dos horizontes anteriores, es la zona de contacto entre el suelo y la roca madre.

**Ilustración 1: Horizontes del suelo**

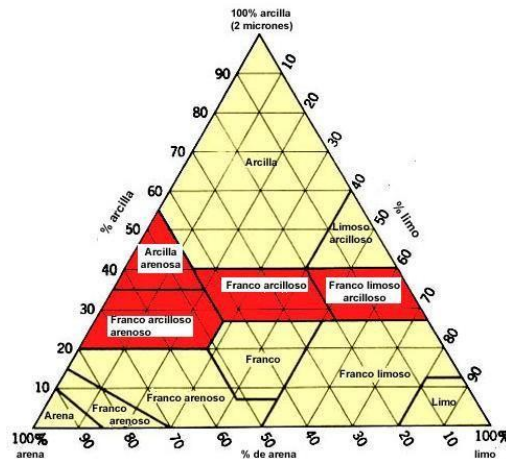


Fuente: <http://www.edafologia.net/introeda/tema01/perfil2.htm>

**2.2.2 Textura del suelo.**

La textura es la porción en la que se encuentran los elementos que lo constituyen (arena, limo y arcilla), y depende de la naturaleza de la roca madre y de los procesos de evolución del suelo. La textura del suelo determina la capacidad de absorción, retención de agua, la cantidad de aire que contiene el suelo, su capacidad portante y parcialmente su fertilidad; la textura se puede determinar desmenuzando el suelo entre los dedos.

**Ilustración 2: Diagrama triangular para determinar la textura del suelo.**



Fuente: [www.pr.nrcs.usda.gov](http://www.pr.nrcs.usda.gov), tomado de Crosara Alicia, textura del suelo, <http://edafología.fcien.edu.uy/archivos/Practico%203.pdf>

A continuación se expone cuales son los elementos que conforman el suelo y en la tabla 1 se encuentra la clasificación de las partículas según su tamaño en los sistemas de medición:

- **Arena:** Es posible tener arena muy gruesa, arena gruesa, arena media, arena fina y arena muy fina, estos agregados forman los suelos arenosos, las partículas son las de mayor tamaño y tienen poca capacidad de retención de agua.
- **Arcilla:** Las partículas que contienen arcilla forman los suelos arcillosos, son las que mayor efecto producen sobre las propiedades de los suelos, las partículas son coloidales, presentan forma plana, además son buenos absorbentes de agua, iones y gases.
- **Limo:** Los limos son suelos de granos finos y están constituidos por materiales heredados en él y las transformaciones son mayores.

**Tabla 1: Clasificación de las partículas del suelo.**

| Tipo de partícula | Sistema Americano<br>Diámetro (mm) | Sistema Internacional<br>Diámetro (mm) |
|-------------------|------------------------------------|--|
| Arena muy gruesa  | 2,00-1,00                          | -----                                  |
| Arena gruesa      | 1,00-0,50                          | 2,00-0,20                              |
| Arena media       | 0,50-0,25                          | -----                                  |
| Arena fina        | 0,25-0,10                          | 0,20-0,02                              |
| Arena muy fina    | 0,10-0,05                          | -----                                  |
| Limo              | 0,05-0,002                         | 0,02-0,002                             |
| Arcilla           | <0,002                             | <0,002                                 |

Fuente: CROSARA Alicia, textura del suelo,  
<http://edafología.fcien.edu.uy/archivos/Practico%203.pdf>

## 2.3 HIDROCARBUROS

Son compuestos orgánicos formados principalmente por carbono e hidrógeno. Su estructura molecular consta de un armazón de átomos de carbono a los que se unen los átomos de hidrógeno. Los hidrocarburos son los compuestos básicos de la Química Orgánica. Debido a que su composición química es sumamente compleja, pudiendo contener miles de compuestos (Rossini, 1960), se ha optado

por clasificar los hidrocarburos por las similitudes que presentan en las estructuras de sus moléculas, en diferentes subgrupos (Kostas, 1993).

- Saturados (*n*-alcanos, alcanos ramificados con cadenas alquílicas y las cicloparafinas o cicloalcanos) (Speight, 1991).
- Fracción aromática (monoaromáticos, diaromáticos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) (Speight, 1991).
- Fracción de resinas y fracción de asfaltenos que son menos abundantes y consisten en compuestos más polares, pudiéndose encontrar hidrocarburos heterocíclicos, hidrocarburos oxigenados y agregados de alto peso molecular (Speight, 1991).

Los hidrocarburos son una fuente importante de generación de energía para las industrias, para nuestros hogares y para el desarrollo de nuestra vida diaria. Pero no son sólo combustibles, sino que a través de procesos más avanzados se separan sus elementos y se logra su aprovechamiento a través de la industria petroquímica.

### 2.3.1 Química de los hidrocarburos.

**Tabla 2: Composición de fracciones químicas de hidrocarburos.**

| Fracción o Subdivisión | Composición  |
|------------------------|--|
| Saturados              | <i>n</i> - alcanos, alcanos de cadena ramificados, 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. |

Fuente: (Viñas Canals, 2005)

### 2.3.1.1 Hidrocarburos alifáticos.

Los hidrocarburos alifáticos están divididos en alcanos acíclicos (normales y ramificados) y cicloalcanos (naftenos) (Atlas R. M., 1981).

Predominan los alcanos, extendiéndose de 1 hasta 40 o más átomos de carbono. Entre los alcanos ramificados se suele encontrar los iso-alcanos (2-metilalcanos) y cantidades menores 3- metilalcanos; los dos grupos tienen un número de átomos de carbono similar a los de los n-alcanos (Viñas Canals, 2005).

- **Naftenos.** Esta familia está compuesta por las cicloparafinas o cicloalcanos. Los compuestos más abundantes de esta familia son los ciclopentanos alquilados (fundamentalmente metilados), que pueden llegar a representar un 31% del crudo. Los compuestos mono y dicíclicos corresponden entre el 50 y 55% de esta fracción, los tricíclicos al 20% y los tetracíclicos al 25% (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).
- **Olefinas.** Son alquenos que presentan concentraciones mínimas en el crudo. Su importancia inicia en los productos resultantes del refinado, ya que se generan durante el proceso de cracking, existiendo hasta un 30% en gasolinas y un 1% en fueles (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).

### 2.3.1.2 Hidrocarburos aromáticos.

Esta fracción la componen moléculas que contienen uno o varios anillos bencénicos en su estructura. Se pueden encontrar hidrocarburos monoaromáticos (un anillo bencénico), diaromáticos (2 anillos bencénicos) y poliaromáticos (HAPs, con más de dos anillos bencénicos) (Viñas Canals, 2005) (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).

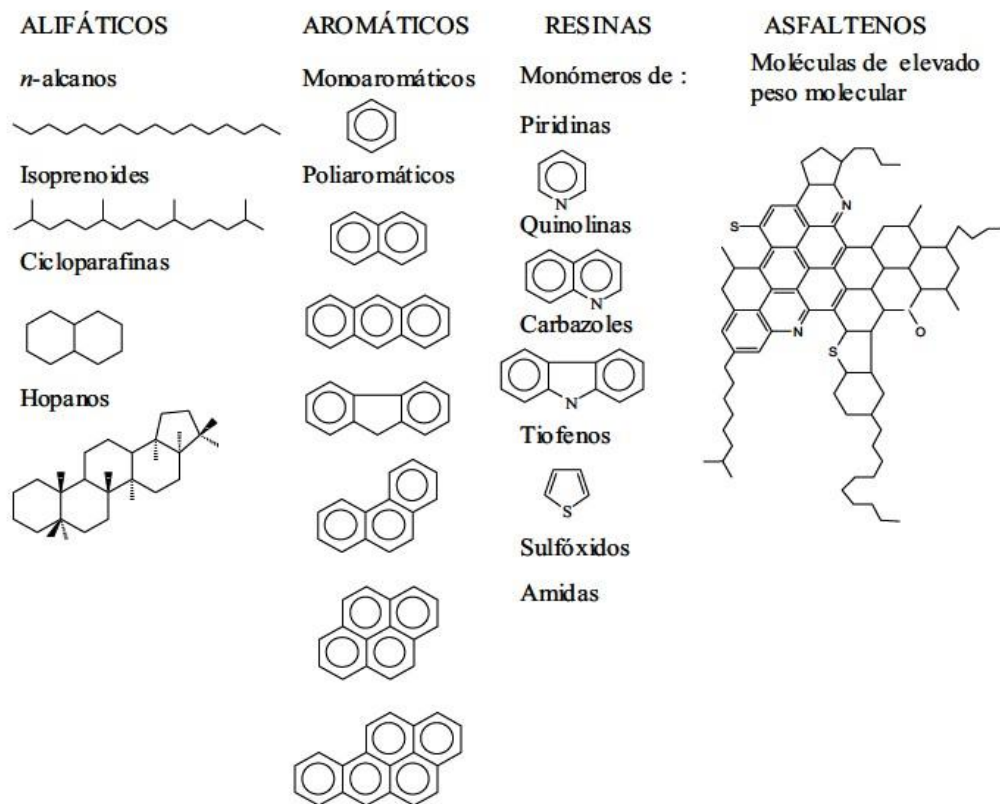
- **Hidrocarburos monoaromáticos:** Se encuentran el benceno y sus alquilados (monoalquilados como el tolueno y dialquilados como los xilenos), formando la familia de los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) de gran importancia ambiental debido a su volatilidad y toxicidad (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).
- **Hidrocarburos poliaromáticos:** Entre los hidrocarburos diaromáticos, se encuentra el naftaleno y sus alquilados (mono, di, tri y tetrametilnaftalenos).

Conforman la familia mayoritaria de hidrocarburos aromáticos presentes en un crudo (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).

### 2.3.1.3 Resinas y Asfaltenos

Se conforman por mezclas complejas, integradas por núcleos policíclicos o naftenoaromáticos. Contienen cadenas hidrocarbonadas con heteroátomos de oxígeno, nitrógeno y azufre (componentes NOS del petróleo) y a veces están asociadas con pequeñas concentraciones de metales como el vanadio y el níquel (Boukir, y otros, 2001). Constituyen entre un 10% en crudos poco degradados o ligeros, hasta un 60% en crudos muy degradados (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009). Se trata de agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfóxidos, amidas, HAP, sulfuros, ácidos nafténicos, ácidos grasos, metaloporfirinas y fenoles polihidratados (Gafonova & Yarranton, 2001).

**Ilustración 3: Estructuras químicas de diferentes componentes del crudo**



Fuente: (Viñas Canals, 2005).



## 2.4 HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO (TPH)

El término hidrocarburos totales de petróleo (TPH) se usa para describir a un extenso número de sustancias químicas derivadas originalmente del petróleo. Los TPH son realmente una mezcla de sustancias químicas. Se les llama hidrocarburos porque casi todos los componentes están formados enteramente de hidrógeno y carbono. Los crudos pueden tener diferentes cantidades de sustancias químicas; igualmente, los derivados del petróleo también varían dependiendo del crudo del que se produjeron. La mayoría de los productos que contienen TPH se incendian. Algunos TPH son líquidos incoloros o de color claro que se evaporan fácilmente, mientras que otros son líquidos espesos de color oscuro o semisólidos que no se evaporan. Muchos de estos productos tienen un olor característico a gasolina, kerosén o aceite. Debido a que en la sociedad moderna se usan tantos productos derivados del petróleo la posibilidad de contaminación ambiental es alta. La contaminación con productos de petróleo estará constituida por una variedad de estos hidrocarburos. Debido al gran número de hidrocarburos involucrados, generalmente no es práctico medir cada uno de ellos. Sin embargo, es útil medir la cantidad total del conjunto de hidrocarburos que se encuentran en una muestra de suelo, agua o aire (ATSDR, 1999).

La cantidad de hidrocarburos totales del petróleo que existe en una muestra indica el tipo de contaminación que puede haber en el lugar. No obstante, la cantidad de TPH que se mide provee poca información acerca de cómo ciertos hidrocarburos de petróleo pueden afectar a las personas, los animales y las plantas. Para tener una idea más clara sobre lo que les sucede a estas sustancias en el ambiente, los científicos han dividido a los TPH en grupos de hidrocarburos basado en el comportamiento similar en el suelo o el agua. Estos grupos se conocen como fracciones de hidrocarburos del petróleo. Cada fracción contiene muchos componentes individuales (ATSDR, 1999).

## 2.5 BIORREMEDIACIÓN

Las biorremediación consisten en usar microorganismos como plantas, hongos, bacterias naturales o modificadas genéticamente para neutralizar sustancias tóxicas, transformándolas en sustancias menos nocivas o convirtiéndolas en inocuas para el ambiente y la salud humana (Benavidez López, y otros, 2006).

La biodegradación es un proceso natural donde los microorganismos degradan o alteran moléculas orgánicas convirtiéndolas en moléculas más pequeñas y no tóxicas (Consejo Argentino para la formación y el desarrollo de la Biotecnología, 2007). Sin embargo, este proceso es muy lento, tomando generalmente más de seis meses para su realización pero se puede acelerar introduciendo determinadas bacterias o plantas en los ambientes contaminados.

En los procesos de biorremediación usualmente se utilizan mezclas de microorganismos, aunque algunos se basan en la introducción de cepas definidas de bacterias u hongos (Consejo Argentino para la formación y el desarrollo de la Biotecnología, 2007).

También se define como el proceso de aceleración de la tasa de degradación natural de hidrocarburos por adición de nutrientes (Ercoli, y otros, 2001).

### **2.5.1 Biorremediación en suelos.**

La biorremediación se utiliza para eliminar contaminantes específicos del suelo, se lleva a cabo degradando o transformando el contaminante en uno o más compuestos de mínima toxicidad o en materia orgánica en descomposición. Estas transformaciones ocurren normalmente en la naturaleza y un uso adecuado de los sistemas biológicos puede incrementar la velocidad de eliminación o degradación del contaminante (Cárdenas, y otros, 1996) (Menezes, Oliveira, Okeke, & Frankenberger, 2003) (Rojas, Rodríguez, Enríquez, Martínez, & Poggi, 1999).

Un proceso de biorremediación, será eficiente si se controlan de manera adecuada y específica las condiciones óptimas para procesos de este tipo, en comparación con alternativas más costosas, económica y ambientalmente como la incineración (Belloso, 1998) (Cursi & Calleja, 2000).

Estos procesos de remediación se pueden acelerar si se adicionan nutrientes como fósforo y nitrógeno a la mezcla; modificar variables como temperatura, pH, humedad y oxígeno también generarán un cambio en el tiempo de acción del proceso (Ercoli, y otros, 2001). Con las variables mencionadas se puede alterar la actividad de los microorganismos que se tengan en el suelo, acelerando sus procesos metabólicos y así retornar a las condiciones naturales de los suelos (Infante, 2001).

**Tabla 3: Ventajas y desventajas de la biorremediación.**

| VENTAJAS  | DESVENTAJAS  |
|---|--|
| <p>Las favorabilidad del método radica en que usualmente solo origina cambios físicos mínimos sobre el medio; cuando se usa de manera adecuada no genera efectos adversos significativos, puede ser útil para retirar algunos de los compuestos tóxicos del petróleo, brinda una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas y es menos costosa que otras tecnologías.</p> | <p>En las desventajas se encuentran que para algunos tipos de contaminación su efectividad no ha sido determinada, su aplicación en el mar puede resultar muy complicada, el tiempo necesario para su acción es largo, la implementación es específica para cada lugar expuesto y su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y de las características del vertido (Corona &amp; Iturbe, 2004).</p> |

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

La biorremediación básicamente consiste en incrementar la velocidad de degradación de los hidrocarburos que están contaminando los suelos, puede ser mediante la mezcla del residuo con la capa superficial del suelo y abonos orgánicos naturales, los cuales contienen microorganismos que se adaptan al consumo y degradación de los hidrocarburos (Chirinos & Pereira, 1999) (Lugo & Mesa, 2001). Durante el tratamiento se pueden generar reacciones físico-químicas, por exposición a agentes naturales, como la radiación solar, la humedad y viento de cada zona (Fonseca & Vargas, 2006).

### **2.5.2 Principales factores que afectan la biorremediación.**

La inoculación consiste en agregar microorganismos al suelo, cuando se tiene una mayor diversidad de estos se pueden aprovechar las especies con mayor eficiencia en la degradación de estos hidrocarburos (Martín, González, & Blanco, 2004). El ambiente donde se esté llevando a cabo el proceso también afecta al alterarse variables como temperatura, oxígeno y nutrientes; para un trabajo óptimo de biodegradación la temperatura debe estar en un rango de 5–35 °C, porque la degradación se comporta de manera directa a la temperatura; a menor temperatura menor degradación, menor volatilidad y mayor viscosidad, por lo que es aconsejable temperaturas de medias a altas (Trujillo Toro & Ramirez Quirama, 2012).

Los procesos de bioremediación deben ser aerobios por lo que los niveles de oxígeno no son un obstáculo, la biodegradación aerobia es más efectiva que la anaerobia, debido a esto los suelos que contengan contenido de arena elevado tendrán mejor respuesta a estos procedimientos (Holliger & Zehnder, 1996). Respecto a los nutrientes es favorable para el proceso una presencia de nitrógeno, fósforo y hierro, (Alexander M. , Biodegradation and Bioremediation, 1999) (Atlas & Unterman, Bioremediation. In: Demain AL & Davies JE (eds), 1999) (Eweis, Ergas, Chang, & E., 1999)

### **2.5.3 Métodos de biorremediación en suelos.**

La biorremediación puede llevarse a cabo in situ: excavando el terreno y tratándolo en este lugar, o bien ex situ, en instalaciones aparte. La técnica adecuada para este proceso, se define luego de valorar de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante a tratar (Morelli, 1999) (Torres & Zuluaga, 2009).

#### ➤ Biorremediación in situ

Esta técnica es la opción más adecuada para recuperar suelos ya que no es necesaria la preparación y excavación del material contaminado. Sin embargo, antes de decidir el tipo de tratamiento deben analizarse diferentes factores entre ellos el impacto ambiental en la zona, las actividades industriales que pueden verse afectadas, los costos en comparación con otros tratamientos, las dificultades de acceso a la zona contaminada para suministrar oxígeno y nutrientes, la velocidad del proceso y peligro de que se extienda la contaminación (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009). Existen diferentes técnicas entre las cuales se tiene:

- Bioaireación o bioventeo: Consiste en estimular la biodegradación aerobia de un contaminante suministrándole de aire en el sitio contaminado.
- Bioestimulación: Se basa en la adición de oxígeno y/o nutrientes en el suelo contaminado con el fin de estimular la actividad de los microorganismos autóctonos de la zona y con esto la biodegradación de los contaminantes (Van Deuren, Wang, & Ledbetter, 1997).
- Bioaumentación: Básicamente es la adición de microorganismos vivos que

tienen la capacidad de degradar el contaminante y así promover su biodegradación o biotransformación (Riser-Roberts, 1998)

➤ Biorremediación ex situ

Se lleva a cabo cuando el procedimiento se realiza fuera del lugar donde está la contaminación (Torres & Zuluaga, 2009). Entre las técnicas más utilizadas se tienen:

- Landfarming: Es una tecnología de biorremediación aplicada a suelos contaminados por hidrocarburos, estos suelos son sometidos a un tratamiento biológico con microorganismos que metabolizarán los hidrocarburos, convirtiéndolos en agua y anhídrido carbónico (Rioja Chumazero & Florero Maldonado, 2014).
- Bioceldas o biopilas: Consiste en la formación de pilas de material biodegradable de dimensiones variables, formadas por suelo contaminado y materia orgánica en condiciones favorables para el desarrollo de los procesos de biodegradación de los contaminantes. Estas pilas de compost pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación (Maroto Arroyo & Rogel Quesada).
- Tratamiento de biosuspensión: Se trata de excavar el suelo e introducirlo en un reactor añadiendo nutrientes, agua, y los cultivos microbianos. Se mezcla bien y se airea hasta que las transformaciones de los compuestos seleccionados para su eliminación alcanzan el nivel deseado. Luego de esto se detiene el mezclado y la aireación, y se deja a los sólidos separarse de los fluidos por sedimentación (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009). El sedimento es retirado y, si la transformación ha tenido éxito, el suelo se devuelve a su lugar de origen, mientras que los líquidos se tratan como aguas residuales. El suministro de oxígeno puede realizarse mediante aireación difusa, turbina difusora y aireación superficial (Metcalf. & Eddy., 1991).

➤ Fitorremediación

La fitorremediación constituye una variación de las técnicas de biorremediación, que se basa en el uso de plantas y microorganismos asociados a ellas así como las enmiendas del suelo y técnicas agronómicas dirigidas a liberar, contener, o transformar los contaminantes del suelo (Torres & Zuluaga, 2009).

#### 2.5.4 Landfarming.

Es una técnica de remediación ex situ, aerobia, cuya aplicación usual es la reducción de la concentración de TPH en suelos contaminados (EPA, 2002).

El landfarming es una técnica de remediación de suelos, donde este es retirado a otro terreno acondicionado, reduciendo así las concentraciones de hidrocarburos de petróleo mediante la biodegradación por diferentes microorganismos (Sora Velazco, 2016).

➤ Aplicabilidad:

- Residuos provenientes de industrias lácteas, frigoríficos, alimenticias en general.
- Residuos de industrias petroleras.
- Residuos de industrias químicas y farmacéuticas.
- Barros y fondos de tanques de combustibles e hidrocarburos en general.
- Suelos contaminados por derrames de hidrocarburos.

Esta técnica se basa en la oxigenación del suelo por medio del arado generalmente. Durante el landfarming los materiales contaminados se esparcen en una superficie de suelo, o son extraídos del lugar y puestos sobre una superficie impermeable para evitar contaminación de las capas de suelo o aguas que se encuentran por debajo, las poblaciones de microorganismos naturales del suelo crecen en el material usando el contaminante como fuente de alimento, transformándolo en productos que no son nocivos (EPA, 2002) (Sora Velazco, 2016); el proceso se monitorea y controla mediante los siguientes parámetros:

- Mezclado
- Sistema de recolección de lixiviados
- Cubierta impermeable del suelo
- Contenido de humedad (irrigación de agua)
- Nivel de oxigenación (rastreo o ventilación forzada)
- Nutriente
- pH (se controla con enmiendas agrícolas)
- Temperatura (se monitorea y puede controlarse con riego de agua generalmente).

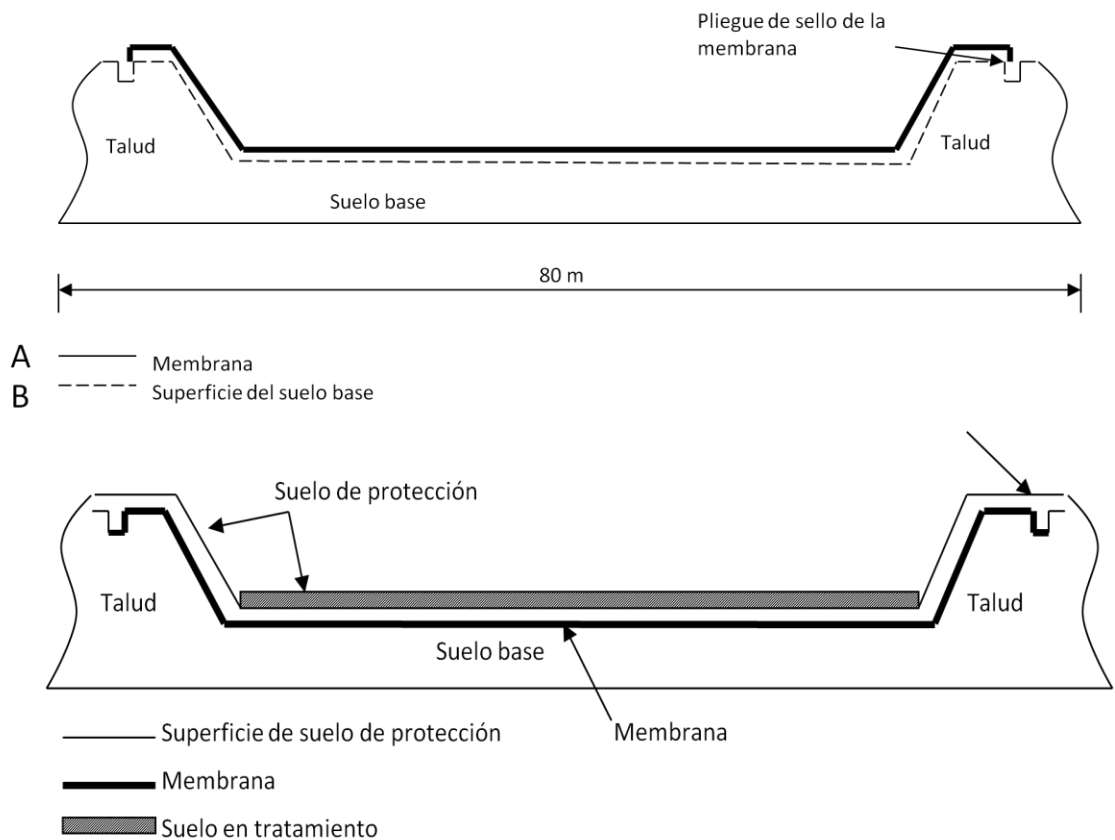
Fundamentalmente se controlan las siguientes condiciones:

- Contenido en humedad: se añade agua mediante un sistema de riego.
- Aireación: el suelo es volteado por métodos mecánicos periódicamente.
- pH: debe permanecer cerca de la neutralidad, por lo que se añadirán enmiendas calizas en caso de aumentar la acidez.
- Otras enmiendas: nutrientes, inoculación de microorganismos.

#### 2.5.4.1 Equipos y requerimientos del terreno.

El Landfarming utiliza equipos agrícolas comerciales tales como tractores, arados, mangueras de riego, y aspersores rotativos. La tecnología requiere de extensas áreas abiertas donde dispersar el material para el tratamiento y estas áreas deben ser preparadas para que tengan un drenaje adecuado, acceso de los equipos y para el manejo de los materiales (Sora Velazco, 2016). En la ilustración 4 se pueden ver los componentes principales que debe tener una zona de landfarming.

#### Ilustración 4: Zona de landfarming



### 2.5.4.2 Pasos para realizar la técnica de landfarming para biorremediación de suelos.

- Se construye una celda de tratamiento.
- Se transfirieren a ésta los suelos a tratar.
- Se prepara una solución acuosa con los insumos.
- Periódicamente se aplica agua para humedecer la mezcla, y se continúa con la aireación, el mezclado y homogenización mecánica de los suelos en tratamiento.
- El trabajo concluye al lograr cumplir con los estándares ambientales establecidos en la normatividad vigente.
- El suelo ya tratado y acondicionado será depositado en el lugar del cual fue extraído.

### 2.5.4.3 Factores y limitaciones a considerar en el landfarming.

Se debe tener en cuenta que la temperatura se debe mantener entre el rango ya que la biodegradación decae con la temperatura (a más temperatura, más biodegradación). Los nutrientes como el nitrógeno y fósforo son fundamentales en el proceso. Se debe mantener un pH entre 7 y 9. La oxigenación es crucial para la remediación (Torres & Zuluaga, 2009).

También existen limitaciones como la potencial contaminación de suelo, agua y aire. El proceso es sensible a condiciones climáticas, se evidencia que no puede degradar los metales del petróleo y solventes clorados. Los VOC's (componentes orgánicos volátiles) emitidos pueden ser transportados por vapor (EPA, 2002) (Torres Delgado & Zuluaga Montoya, 2009).

**Tabla 4: Parámetros a considerar y rangos óptimos durante un proceso de Landfarming para tratamiento de suelos contaminados.**

| Parámetro         | Rango óptimo              |
|-------------------|---------------------------|
| Humedad           | 50 – 80% de la C.C        |
| pH                | 6 - 8; con un óptimo de 7 |
| Temperatura       | 25 - 35 °C                |
| Contaminante(s)   | < 50,000 mg/kg            |
| Metales tóxicos   | < 2,500 mg/kg             |
| Cuenta bacteriana | > 1,000 UFC/g suelo seco  |

Fuente: (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2003)



#### **2.5.4.4 Ventajas del landfarming**

- Simple de diseñar e implementar.
- Es económico con respecto a otras técnicas de biorremediación.
- Es un proceso que no requiere exigentes consideraciones de ingeniería, y a la vez permite una fácil manipulación y control de las variables de diseño y operación.
- Es útil en un amplio rango de hidrocarburos, por ejemplo:
  - Contaminación del terreno por derrames de hidrocarburos
  - Residuos de fondo de tanque
  - Recortes de perforación
  - Residuos de piletas API Independiente de las concentraciones presentes de los materiales.
- Requiere poca maquinaria y la aplicación es segura y no aporta efectos adversos al ambiente durante su desarrollo, al no generar emisiones ni presentar afluentes residuales (Torres & Zuluaga, 2009).

#### **2.5.4.5 Desventajas del landfarming.**

- Requiere grandes extensiones de terreno para disposición de suelos y no es viable si no se cuenta con suficiente área.
- Cuando los contaminantes son hidrocarburos livianos la remediación puede ser acelerada por su volatilización, lo cual generaría problemas con las autoridades ambientales donde las regulaciones de emisiones atmosféricas son exigentes.
- Cuando la contaminación es profunda los costos de excavación y movimiento de tierras pueden ser altos.
- Es difícil predecir el tiempo requerido para un proceso adecuado y el seguimiento y control de la velocidad y/o extensión del proceso.
- El proceso se retarda por inclemencias climáticas

#### **2.5.5 Biorremediación de hidrocarburos en suelos.**

La biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos es un proceso natural que aprovecha las características degradadoras de los microorganismos para eliminar los contaminantes.

La biodegradación de hidrocarburos en el medio ambiente, suele ser más reducida comparada con la actividad en un laboratorio lo que demuestra que la actividad

microbiana se afecta por diferentes parámetros del suelo (Martienssen & Schirmer, 2007). El proceso también depende de muchos factores abióticos que afectan tanto la cantidad de crecimiento microbiano como la actividad enzimática lo que influye en la tasa (Riffaldi, Levi-Minzi, Cardelli, Palumbo, & Saviozzi, 2005); entre los principales factores esta la concentración, fracción y madurez de los hidrocarburos y de las poblaciones microbianas, las propiedades del medio donde se ha vertido como la temperatura, el oxígeno, la humedad y la disponibilidad de nutrientes (Mohn & Stewart, 2000).

### **2.5.6 Biorremediación para disminuir niveles de TPH en suelos.**

Con el fin de tener una mayor disminución de TPH en los suelos, se han desarrollado proyectos de biorremediación que usan bacterias u otros elementos orgánicos en los suelos contaminados. La biorremediación se puede definir como un proceso en el que se utilizan mecanismos bioquímicos en organismos para degradar suelos contaminados y convertirlos en productos finales menos tóxicos y nocivos para la salud. 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 (Mohn & Stewart, 2000).

El landfarming es considerado un método ex situ, en el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables. El material contaminado se mezcla con paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas, que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, incluidas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso (Riffaldi, Levi-Minzi, Cardelli, Palumbo, & Saviozzi, 2005).

## **2.6 ABONO ORGÁNICO CEAGRODEX**

El abono utilizado en el desarrollo de este proyecto es fabricado por la empresa huilense CEAGRODEX bajo la técnica del compostaje, el cual se genera a partir de la descomposición de estiércol y contenido ruminal, restos de animales bovinos, lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, material vegetal como restos de podas ramas, hojas, césped), cáscaras de frutas-hortalizas y cal (Ceagrodex, 2017).

### **2.6.1 Proceso de fabricación.**

La idea de fabricar un abono 100% orgánico nació en el año 2010, mediante el procesamiento de diferentes materiales generando pilas, las cuales deben pasar por diferentes etapas, mediante la adición diaria de microorganismos creados por la 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 el abono (Ceagrodex, 2017).

### 2.6.2 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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 2.55 %   |
| Potasio total (K <sub>2</sub> O)               | 0.51 %   |
| Sodio (Na)                                     | 1.05 %   |
| Humedad  | 35.5 %   |
| pH   | 7.23   |
| Densidad                                       | 0.19 g/cm <sup>3</sup>   |
| Metales pesados                                | Contenido de metales pesados por debajo de los límites establecidos en la norma. |
| Salmonella spp                                 | Ausente  |
| Entero bacterias                               | <10 ufc/g  |
| C/N  | 14.5   |
| Nitrógeno Total (N)                            | 1.86   |
| Fósforo Total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 1.701%   |
| Potasio (K <sub>2</sub> O)                     | 0.4333%  |
| Color  | Café   |
| Olor   | Amoniacal y a geosminas (olor a tierra fértil).                                  |

Fuente: (Ceagrodex, 2017)

### 2.6.3 Análisis microbiológico.

**Tabla 6: Microorganismos presentes en abono de Ceagrodex.**

| Meso filios<br>Ufc/g | Termófilos<br>Ufc/g | Moho<br>Ufc/g | Levadura<br>ufc/g | Nematodo<br>y/o<br>protozoos | Entero<br>Bacterias<br>Ufc/g | Salmonella en<br>25 g |
|----------------------|---------------------|---------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 1,80E+10             | 2,10E+11            | 1,00E+10      | 0,00E+00          | Ausentes                     | 0,00E+00                     | Ausentes              |

Fuente: (Ceagrodex, 2017)

**meq/100 g = Mili equivalente por 100 gramos**

**Ufc/g = Unidades formadoras de colonia por gramo**

### 2.6.4 Beneficios del abono Ceagrodex.

➤ 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.

### 2.6.5 Influencia del abono en biorremediación de hidrocarburos.

Es posible encontrar gran variedad de materiales que se utilizan como fuente de materia orgánica para el suelo y que se pueden aplicar de manera directa o luego

de un proceso de preparación, como abonos orgánicos (Lopez, 1994). Según su origen, se pueden clasificar los materiales en diferentes clases como: ganadero, forestal, industrial y urbano. Normalmente, los abonos orgánicos se producen partiendo del proceso de compostaje con el fin de mejorar la calidad del suelo. El tipo materia prima utilizada para hacer los abonos orgánicos determinará las características finales del material (Durán & Henríquez, 2007).

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

Estudios sobre la degradación de hidrocarburos han probado que algunos microorganismos son muy útiles en la catabolización de moléculas recalcitrantes, por lo que se utilizan para biorremediar ambientes contaminados por derrames de petróleo (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2003). La aplicación de abonos orgánicos aumenta la materia orgánica del suelo y mejora ciertas 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 CEAGRODEX un agente biodegradable idóneo para reducir los niveles de contaminación que se puede llegar a presentar por parte de los hidrocarburos en el suelo.

## **2.7 DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS**

### **2.7.1 Degradación microbiana de hidrocarburos**

La biodegradación microbiana de hidrocarburos estudia el hecho de que los microorganismos pueden crecer a expensas de utilizar estos compuestos químicos. Aunque parezca imposible que un organismo sea capaz de alimentarse a expensas de compuestos tan extraños y quizá nocivos para el ser humano, las investigaciones llevadas a cabo por geoquímicos y microbiólogos ofrecen una explicación (Solanas, 2009). Revisando los hechos ocurridos a lo largo de los

tiempos geológicos desde la formación de la tierra hasta ahora, se puede ver que los microorganismos están en la tierra desde hace más de tres mil millones y medio de años, mientras que los organismos superiores desde hace menos de mil millones de años y el hombre desde hace sólo 6 millones de años, un instante a escala de tiempos geológicos (Solanas, 2009).

Durante millones de años, se han seleccionados enzimas que han aparecido por mutación o intercambio genético en determinados microorganismos capaces de metabolizar los hidrocarburos (Solanas, 2009). Es posible entender que los microorganismos hayan desarrollado las capacidades necesarias para metabolizar los hidrocarburos y por el contrario presenten mayores dificultades en degradar pesticidas o explosivos, productos sintetizados por el hombre, y que a escala de los tiempos geológicos sólo haría un instante que están en la tierra. Para algunos de estos compuestos, denominados xenobióticos, los microorganismos, pese a su rápida adaptación a nuevas situaciones, podrían no haber sintetizado todavía los enzimas necesarios (Huanachea-Bordon, 2007).

### **2.7.2 Factores que condicionan la biodegradación de hidrocarburos.**

Existen tres grupos de factores que condicionan la biodegradación microbiana de hidrocarburos, los relacionados con las características del hidrocarburo, los relacionados con el medio y los relacionados con los microorganismos presentes (Alexander M. , Biodegradation and bioremediation, 2004). Los microorganismos pueden degradar una parte importante de un crudo pero tienen preferencias por algunos hidrocarburos; los crudos están formados por cuatro familias de compuestos o fracciones: los hidrocarburos alifáticos, los hidrocarburos aromáticos, las resinas y los asfáltenos (Solanas, 2009). Los microorganismos degradan con facilidad los hidrocarburos lineales de la fracción alifática, especialmente los que contienen menos de 28 carbonos, aunque se han llegado a describir biodegradaciones de hidrocarburos de hasta 44 carbonos. Los isoprenoides, y los hidrocarburos cíclicos o nafténicos son degradados más lentamente que los lineales (Alexander M. , Biodegradation and bioremediation, 2004). Respecto a los aromáticos, a medida que aumenta el número de anillos y los sustituyentes alquilo, por tanto, su peso molecular, es mayor la resistencia a la biodegradación (Prince, 2005).

El medio donde se encuentra el contaminante debe proporcionar las mejores condiciones a los microorganismos para que su actividad metabólica sea la adecuada para degradar los hidrocarburos (Alexander M. , Biodegradation and

bioremediation, 2004). En el caso de los hidrocarburos, aunque existen microorganismos que pueden degradarlos anaeróbicamente, se sabe que el metabolismo más eficaz es el aeróbico por lo que la presencia de oxígeno es muy importante. En el caso de la zona no saturada del suelo, una variable muy importante es la humedad que deberá encontrar un valor óptimo entre aquel que requieren los microorganismos para su metabolismo y el que permita una buena aireación (Solanas, 2009). Hay que analizar que los hidrocarburos sólo contienen carbono (C) e hidrógeno (H), mientras que una célula microbiana contiene C, nitrógeno (N), fósforo (P), además de otros micronutrientes, en unas proporciones determinadas. Para que el microorganismo pueda crecer a expensas de los hidrocarburos deberá tener suficiente N y P además del C y H. Es por ello que en medios pobres en N y P se necesitará suplementar con nutrientes o fertilizantes (Prince, 2005).

### **2.7.3 Degradación de hidrocarburos alifáticos en procesos aeróbicos.**

Los hidrocarburos alifáticos se pueden clasificar en alcanos, alquenos y alquilos dependiendo de lo saturados que estén sus enlaces. Como norma general decir que cuanto más insaturada sea una cadena carbonatada más difícil o lenta será su degradación (Widdel & Rabus, 2001). Igualmente 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 (Bioinformatica.uab, 2016).

La presencia de ramificaciones disminuyen la tasa de biodegradación porque los átomos de carbono terciario y cuaternario interfieren con los mecanismos de degradación o lo bloquean totalmente (Rittmann & McCarty, 2001).

Los microorganismos que utilizan hidrocarburos como sustrato actúan en presencia de enzimas denominada monooxigenasas y/o dioxigenasas. La mayoría de estos microorganismos son capaces de sobrevivir en ese ambiente y pueden degradar sin problemas los hidrocarburos de cadena larga (Widdel & Rabus, 2001). Para entenderlo mejor se puede decir que para que los microorganismos puedan degradar alcanos, primero deben oxidar el último carbono de la molécula por medio del complejo multienzimático que no hace 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 es como se obtiene una molécula similar a un ácido graso y puede ser degradado a acetyl-CoA por b-oxidación (Bioinformatica.uab, 2016) (Widdel & Rabus, 2001).

#### **2.7.4 Degradación de hidrocarburos aromáticos en ambientes aeróbicos.**

En los hidrocarburos aromáticos el problema para su degradación es romper los anillos aromáticos que pueden ser muy variados. Los microorganismos que utilizan estos compuestos como fuente de carbono, no utilizan una enzima monooxigenasa específica para cada molécula si no que utilizan unas vías bioquímicas llamadas vías altas o periféricas que consisten en modificar los diferentes anillos aromáticos absorbidos (Bioinformatica.uab, 2016). Es decir, la gran variedad de compuestos aromáticos que se pueden encontrar son modificados; partiendo de estas moléculas es 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 (Janssen, Oppentocht, & Poelarends, 2001).

### **2.8 LEGISLACIÓN AMBIENTAL**

La normatividad ambiental sobre la protección y conservación del suelo como recurso natural, tiene unos lineamientos relativamente nuevos. En 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 Arroyave & Correa Restrepo, 2009).

Luego de realizar estudios de investigación sobre la susceptibilidad de algunos suelos de degradación, se emitió en Europa en 1972 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 imperativa necesidad de generar acciones para su conservación (Solano Marin, 2005).

En la cumbre de Río de Janeiro en 1992, se reconoce la importancia de la protección del suelo con el propósito de alcanzar un verdadero desarrollo sostenible, haciendo énfasis en la prevención y control de acciones que generan contaminación y degradación (Sanclemente Reyes, 2011). En ese mismo año, se desarrollaron dos convenios muy importantes: el de diversidad biológica y el de cambio climático, los cuáles reconocieron aspectos importantes como la relación que existe entre el suelo y los ecosistemas 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 (Solano Marin, 2005).



Al terminar la convención de las Naciones Unidas por la lucha contra la desertificación en 1994, se generaron medidas para 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 Arroyave & Correa Restrepo, 2009).

Basado en investigaciones la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), emitió 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 (EPA, 2002). Otras cumbres como la de Johannesburgo (2002) sobre diversidad biológica y Copenhague (2009) sobre cambio climático, refuerzan la idea de la conservación del suelo buscando alcanzar el verdadero desarrollo sostenible.

### **2.8.1 Legislación ambiental en Colombia.**

La legislación nacional se rige 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 35 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” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). En este mismo decreto igualmente se establece:

1. Art. 178: Los suelos del territorio nacional deberán usarse de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos.
2. 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.
3. 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.

4. 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.

Lograr la preservación y la restauración del ambiente y la conservación, mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables, según criterios de equidad que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos, la disponibilidad permanente de estos y la máxima participación social, para beneficio de la salud (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la administración pública respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y de ambiente

Artículo 39.o- Para prevenir y para controlar los efectos nocivos que puedan producir en el ambiente el uso o la explotación de recursos naturales no renovables, podrán señalarse condiciones y requisitos concernientes a:

a.- El uso de aguas en el beneficio o el tratamiento de minerales, de modo que su contaminación no impida ulteriores usos de las mismas aguas, en cuanto estos fueren posibles;

b.- El uso de aguas en la exploración y explotación petrolera, para que no produzca contaminación del suelo ni la de aguas subterráneas;

Artículo 48-49. Al determinar prioridades para el aprovechamiento de las diversas categorías de recursos naturales se tendrán en cuenta la conveniencia de la preservación ambiental, la necesidad de mantener suficientes reservas de recursos cuya escasez fuere o pudiere llegar a ser crítica. Las prioridades referentes a los diversos usos y al otorgamiento de permisos, concesiones o autorizaciones sobre un mismo recurso, serán señaladas previamente, con carácter general y para cada región del país, según necesidades de orden ecológico, económico y social.

De acuerdo con el artículo 677 del Código Civil, se entiende que un agua nace y muere en una heredad cuando brota naturalmente a su superficie y se evapora o desaparece bajo la superficie de la misma heredad.

Toda persona tiene derecho a utilizar las aguas de dominio público para satisfacer sus necesidades elementales, las de su familia y las de sus animales, siempre que con ello no cause perjuicios a terceros.

El uso deberá hacerse sin establecer derivaciones, ni emplear máquina ni aparato, ni detener o desviar el curso de las aguas, ni deteriorar el cauce o las márgenes de la corriente, ni alterar o contaminar aguas que en forma que se imposibilite su aprovechamiento por terceros. Cuando para el ejercicio de este derecho se requiera transitar por predios ajenos, se deberá imponer la correspondiente servidumbre.

Por ministerio de la ley se podrá hacer uso de aguas de dominio privado, para consumo doméstico exclusivamente. Salvo disposiciones especiales, solo puede hacerse uso de las aguas en virtud de concesión. En caso de escasez, de sequía u otros semejantes, previamente determinados, y mientras subsistan, se podrán variar la cantidad de agua que puede suministrarse y el orden establecido para hacerlo.

Para poder otorgarle, toda concesión de aguas estará sujeta a condiciones especiales previamente determinadas para defender las aguas, lograr su conveniente utilización, la de los predios aledaños, y en general, el cumplimiento de los fines de utilidad pública e interés social inherentes a la utilización. El dueño o el poseedor del predio o industria podrán solicitar concesión de aguas. También podrá hacerlo el tenedor, a nombre del propietario o del poseedor, quien pretenda construir obras que ocupen el cauce de una corriente o depósito de agua, deberá solicitar autorización.

El usuario a quien se haya otorgado una concesión de aguas y el dueño de aguas privadas estarán obligados a presentar, para su estudio y aprobación, los planos de las obras necesarias para captar, controlar, conducir, almacenar, o distribuir el caudal. Las obras no podrán ser utilizadas mientras su uso no se hubiere autorizado.

En la resolución de concesión se señalará el sitio a donde deben afluir los sobrantes de aguas usadas en riego, para que vuelvan a su cauce de origen o para que sean usadas por otro predio, para lo cual se construirán las acequias o canales correspondientes.

Sin permiso, no se podrán alterar los cauces, ni el régimen y la calidad de las aguas, ni interferir su uso legítimo. Se negará el permiso cuando la obra implique peligro para la colectividad, o para los recursos naturales, la seguridad interior o exterior o la soberanía Nacional.

Los usuarios están obligados a:

- a.- Aprovechar las aguas con eficiencia y economía en el lugar y para el objeto previsto en la resolución de concesión, empleando sistemas técnicos de aprovechamiento;
- b.- No utilizar mayor cantidad de aguas que la otorgada;
- c.- Permitir la vigilancia e inspección y suministrar los datos sobre el uso de las aguas.

Cuando las aguas servidas no puedan llevarse a sistema de alcantarillado, su tratamiento deberá hacerse de modo que no perjudique las fuentes receptoras, los suelos, la flora o la fauna. Las obras deberán ser previamente aprobadas.

Cuando se compruebe que las aguas del subsuelo de una cuenca o de una zona se encuentran en peligro de agotamiento o de contaminación, o en merma progresiva y sustancial en cantidad o calidad, se suspenderá definitiva o temporalmente el otorgamiento de nuevas concesiones en la cuenca o zona (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

#### ADMINISTRACIÓN DE LAS AGUAS Y CAUSES

Corresponde al Gobierno:

- a) Autorizar y controlar el aprovechamiento de aguas y la ocupación y explotación de los cauces;
- b) Reservar las aguas de una o varias corrientes, o parte de dichas aguas;
- c) Ejercer control sobre uso de aguas privadas, cuando sea necesario para evitar el deterioro ambiental o por razones de utilidad pública e interés social.

Cuando una derivación beneficie varios predios de distinto dueño o poseedor a quienes se hubiera otorgado concesión de aguas, por ministerio de la ley habrá comunidad entre ellos con el objeto de tomar el agua, repartirla entre los usuarios y conservar y mejorar el acueducto, siempre que no hayan celebrado una convención con igual fin (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Debido a que no existe legislación o reglamentación clara y detallada sobre 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, no obstante, muchos estudios realizados en Colombia se encuentran amparados por la norma Louisiana 29B, en la cual se establece como valor máximo permitido de contenido de TPH's de un 3% (Ibarra Mojica, 2008).

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 LOCALIZACIÓN Y GEOLOGÍA DE ZONA DE TRATAMIENTO

La planta piloto de landfarming se realizó en una zona a las afueras de la ciudad de Neiva, en cercanías con el municipio de Palermo. El sector fue escogido debido a la cercanía con un cuerpo de agua, lo cual permite la presencia de sedimentos y materia orgánica acumulada, puesto que la mayor presencia de materia orgánica permite un mejor proceso de remediación.

Cabe resaltar que la zona se encuentra dentro de una propiedad privada a la cual se tuvo acceso mediante permiso de sus propietarios y que además la finca colinda con la Batería Santa Clara al servicio de HOCOL, en donde se prestan servicios de recibo, almacenamiento, separación de gas, re-envío de gas a otras baterías, consumo local de gas y quema de los excesos. Al ser un lugar de fiscalización, presenta diferentes líneas que conectan a los pozos y demás baterías; líneas a través de las cuales el fluido viaja y en cualquier punto puede presentarse un derrame o fuga, afectando las zonas colindantes como cuerpos de agua y suelos.

Las actividades realizadas en los sectores cercanos a la zona de tratamiento del suelo, suponen que el estudio que se realizó podría llegar a ser aplicado en caso de un fallo en los equipos de la batería y un posterior derrame de hidrocarburos. Por esta razón se trabajó con suelos característicos de la zona que estén en riesgo de sufrir afectaciones por aceites hidrocarburos de cualquier tipo.

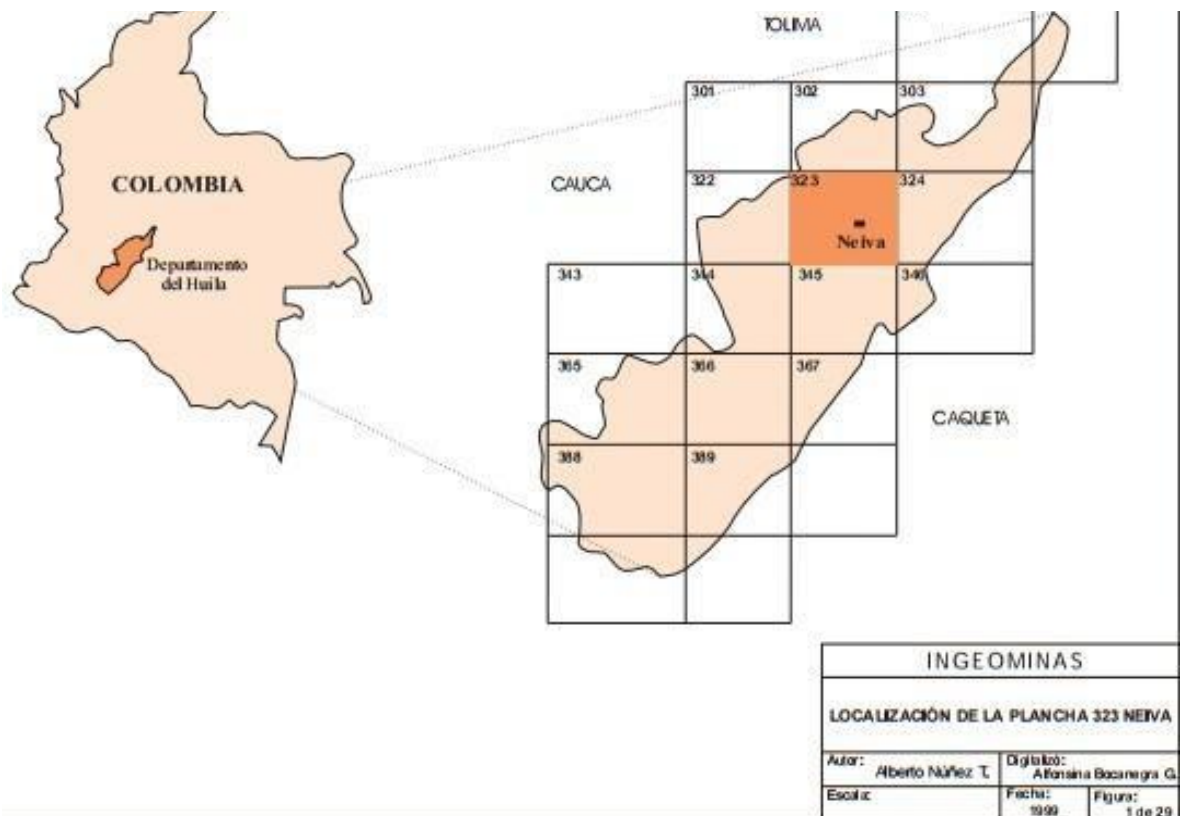
**Ilustración 4: Ubicación de la planta piloto de landfarming**



### 3.2 PLANCHA 323-NEIVA.

La más reciente versión del mapa cartográfico de Colombia publicada en 2015, indica que el país se encuentra conformado por un total de 568 planchas geológicas, donde cada una presenta una descripción detallada acerca de la geología y estratigrafía de la zona que representa. Para este proyecto, la locación donde se desarrolló dicho la planta piloto comprende la zona de plancha 323-Neiva.

**Ilustración 5: Localización Plancha 323 – Neiva.**



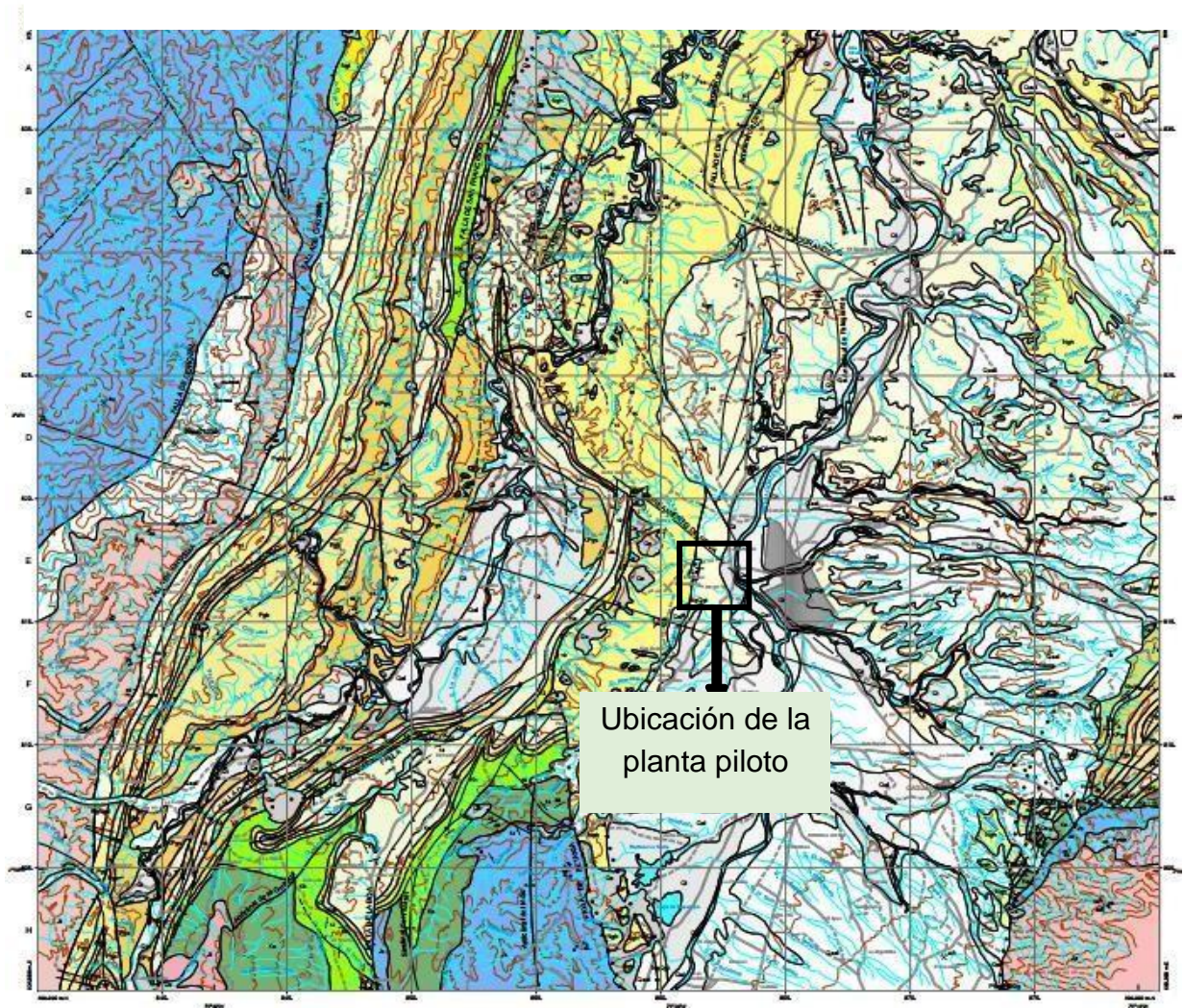
Fuente: (Ingeominas, 2002)

La Plancha 323 Neiva, proveniente del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con una extensión de 1.800 km<sup>2</sup>, se encuentra ubicada al norte del Departamento del Huila; según la geología presente en esta plancha es posible observar que cubre parte del Valle Superior del Magdalena (VSM) en la



Subcuenca de Neiva. En esta área afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, igual que extensos depósitos inconsolidados de origen sedimentario.

### Ilustración 6: Geología Plancha 323 – Neiva.



Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2015)

Las estructuras geológicas más relevantes en la zona son el Sistema de Fallas de Chusma y fallas asociadas al Sistema de Fallas de Garzón-Algeciras; estos sistemas denotan 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, principalmente 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 abarca la Plancha 323 se ve afectado por fenómenos de erosión y remoción en masa, causados por las condiciones naturales de la zona y acelerados por la actividad humana. La zona más crítica es el noroeste, donde la extracción de rocas calcáreas y la apertura de vías con limitada dirección técnica son los factores que más inciden en el deterioro ambiental y los fenómenos de inestabilidad.

### **3.2.1 Estratigrafía de la zona de estudio.**

En la zona 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.

#### **4. MARCO EXPERIMENTAL**

El proyecto se realizó en 5 etapas fundamentales:

- Recolección y preparación del suelo de la zona para tratamiento.
- Adecuación del terreno para la planta piloto de landfarming.
- Obtención y caracterización del crudo a utilizar en el tratamiento.
- Caracterización del suelo recolectado.
- Estudio de biorremediación.

##### **4.1 RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL SUELO DE LA ZONA PARA TRATAMIENTO**

El suelo a tratar fue tomado de las instalaciones de la finca la Bonita, se ubicó un punto donde se escavó a unos 30 centímetros de profundidad y se tomó todo el suelo necesario para el tratamiento. La totalidad de suelo utilizado en el proyecto proviene de la misma zona para tener igualdad en las condiciones, además se tamizó y homogenizó para un mejor resultado en la biorremediación.

##### **4.2 ADECUACIÓN DEL TERRENO PARA LA PLANTA PILOTO DE LANDFARMING**

La adecuación del terreno fue una tarea bastante laboriosa y que abarcó una gran cantidad de tiempo, pues era un terreno con bastante vegetación y un suelo muy árido y de difícil trabajo.

Se inició limpiando la zona, desmontándola con ayuda de guadañadora y machetes, luego se realizó una demarcación tentativa sobre las medidas que iba a tener la planta piloto de landfarming; estas medidas se tomaban con el fin de tener una referencia para saber la cantidad de polisombra, plástico y lona verde se utilizaría

**Ilustración 7: Terreno inicial de la planta piloto de Landfarming**



Fuente: Autores

**Ilustración 8: Terreno final de la planta piloto de Landfarming**



Fuente: Autores

**Ilustración 9: Terreno final de la planta piloto de Landfarming**



Fuente: Autores

### 4.3 OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO

El crudo utilizado en este proyecto fue suministrado por la empresa ECOPETROL proveniente del campo Tello. Las características principales como API y la densidad se presentan en la tabla 8; estos datos fueron reportados por la empresa.

**Tabla 7: Datos del crudo de campo Tello.**

| CRUDO CAMPO TELLO  |        |
|--------------------|--------|
| °API               | 21     |
| Densidad del Crudo | 0.8993 |

Fuente: (ECOPETROL, 2017)

Contiene gran concentración de hidrocarburos de mediano peso molecular, con este tipo de petróleo se busca para obtener la mayor cantidad de parafinas, polímeros, aceites, combustibles.

### 4.4 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO RECOLECTADO

Para lograr una eficiencia en el proceso de biorremediación 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 de abono orgánico.

Todos la teoría sobre los procesos para caracterización de la muestra de suelo se encuentran en el Anexo B, luego de este todos los procedimientos llevados a cabo y los materiales necesarios para cada uno de los experimentos, se explica de manera detallada en el Anexo B.

Durante el proceso se controló en nivel de humedad de la mezcla con riego de agua manual, se midieron los niveles mediante el método gravimétrico (Anexo B) y se mantuvo entre 50 y 85% como es requerido para este tipo de procesos.

#### 4.4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS AL SUELO

**Tabla 8: Características del suelo utilizado en el proceso.**

| Parámetro                               | Resultado   |
|---|---|
| pH                                      | 6,6 (Neutro)  |
| Clasificación Textural (Mét. Bouyoucos) | Suelo Arenoso<br>(Arena: 89%; Arcilla: 4%; Limos: 7%) |
| Color                                   | Brown (2.5 value y 5/4 chromo)                        |
| Densidad Aparente                       | 2,28 g/cm <sup>3</sup>                                |
| Densidad Real                           | 1,61 g/cm <sup>3</sup>                                |
| Porosidad                               | 29,4  |
| Humedad                                 | 8%  |

Fuente: Autores

#### 4.5 MÉTODO DE EVALUACIÓN DE TPH

##### 4.5.1 Método gravimétrico modificado (extracción con solvente).

Este método se eligió para el desarrollo del proyecto debido a que en investigaciones previas se demostró su gran utilidad y practicidad a la hora de realizar determinación de hidrocarburos totales de petróleo. Teniendo en cuenta las limitantes a nivel de recursos de laboratorio y reactivos.

Según lo anteriormente mencionado se realizó una modificación y adecuación del método gravimétrico empleado, que básicamente fue el uso de reactivos, ya que en el laboratorio no se encontraron las sustancias originalmente requeridas (Sulfato de cloro anhidro, diclorometano y el hexano), sin embargo, se empleó como agente barredor el cloroformo, cuyas características suplen y cumplen la misma función 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 utilizó.

La teoría previa a este método se encontrara en el Anexo A junto con procedimiento y materiales para la realización del estudio según las adecuaciones hechas teniendo en cuenta los productos con los que se contaba y la finalidad por la cual se corrían las pruebas se encontraran en el Anexo B.

## 4.6 DISEÑO Y MONTAJE EXPERIMENTAL

### 4.6.1 Planta piloto de landfarming

Para realizar el proceso de biorremediación se seleccionó una zona de la finca La Bonita, allí se instaló la planta piloto de landfarming. Se inició montando unos pilares (guaduas) en el contorno de la ubicación, igualmente se dispuso una gran cantidad de alambre por todo el montaje para darle estabilidad y firmeza a la poli sombra (techo) y la lona verde que se instaló por un costado para proteger las eras del contacto directo del sol, teniendo en cuenta que las temperaturas de la región son bastante elevadas. La planta piloto consta de 6 espacios de 1 metro de largo por 1 metro de ancho y 30 centímetros de profundidad aproximadamente, los cuales fueron divididos en dos partes para tener un total de 12 espacios de 1 metro por 50 centímetros; fueron recubiertos con un plástico grueso para evitar el contacto con el suelo de la zona, además se les diseñó un sistema de drenaje para los lixiviados.

#### Ilustración 11: Terreno de planta piloto de landfarming



Las eras (muestras) se vertieron en sus espacios correspondientes, todas con el mismo peso o cantidad de suelo-abono, su diferencia radicaba en la concentración del crudo y en el pH (7 y 9). A las eras se les diseñó un sistema de drenaje para los lixiviados con tubos de pvc y juntas de plástico; al terreno se le elaboró una inclinación leve pero suficiente para que los lixiviados se depositen en unos tarros plásticos ubicados en huecos realizados a una profundidad mayor que el de las eras para facilitar el drenaje.

**Ilustración 12: Terreno de planta piloto de landfarming**



**Ilustración 13: Distribución de las eras en el terreno**



**Ilustración 14: Sistema de drenaje para lixiviados.**





## 5. RESULTADOS

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DEL HIDROCARBURO

Para desarrollar el proyecto de biorremediación fue necesario conocer ciertas propiedades del hidrocarburo utilizado como contaminante, tales como gravedad API y densidad. Estos datos fueron reportados por la empresa ECOPETROL y se representaron en la tabla 8.

Basado en estos datos se realizaron los cálculos para conocer la cantidad de contaminante que se aplicaría en cada era.

### 5.2 CÁLCULOS PREVIOS A LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ERAS

- La cantidad seleccionada de abono y suelo fue cada uno de 15 libras, para así tener un volumen representativo.
- Con estos datos se puede saber entonces que para las cargas contaminantes de 3, 5 y 10 % los valores en gramos de hidrocarburo serán:

#### 5.2.1 Distribución de las eras

**Tabla 9: Distribución de las eras.**

|        | Relación suelo: abono 1:1 |           | Crudo         | pH |
|--------|---------------------------|-----------|---------------|----|
|        | Suelo                     | Abono     |               |    |
| Era 1  | 15 libras                 | 15 libras | 408.24 gramos | 7  |
| Era 2  | 15 libras                 | 0 libras  | 408.24 gramos | 7  |
| Era 3  | 15 libras                 | 15 libras | 408.24 gramos | 9  |
| Era 4  | 15 libras                 | 0 libras  | 408.24 gramos | 9  |
| Era 5  | 15 libras                 | 15 libras | 680.4 gramos  | 7  |
| Era 6  | 15 libras                 | 0 libras  | 680.4 gramos  | 7  |
| Era 7  | 15 libras                 | 15 libras | 680.4 gramos  | 9  |
| Era 8  | 15 libras                 | 0 libras  | 680.4 gramos  | 9  |
| Era 9  | 15 libras                 | 15 libras | 1360.8 gramos | 7  |
| Era 10 | 15 libras                 | 0 libras  | 1360.8 gramos | 7  |
| Era 11 | 15 libras                 | 15 libras | 1360.8 gramos | 9  |
| Era 12 | 15 libras                 | 0 libras  | 1360.8 gramos | 9  |

### 5.2.2 Cálculos de cantidad de contaminante

Como ya se tiene la cantidad de hidrocarburos a utilizar en gramos y también se conoce la densidad del crudo, se puede proceder a hallar la cantidad de contaminante a utilizar en mililitros

—

Siendo

Entonces para una carga contaminante de 3%

\_\_\_\_\_ —

Para una carga contaminante de 5%

\_\_\_\_\_ —

Para una carga contaminante de 10%

\_\_\_\_\_ —

Para llevar a cabo la contaminación del suelo se utilizaron vasos de precipitado de diferentes tamaños, probetas y además jeringas para obtener la mayor precisión posible en los mililitros de contaminante.

### 5.3 CÁLCULO DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO (TPH) PARA CADA ERA EN LOS DIFERENTES TIEMPOS SEÑALADOS

Para obtener los resultados que se utilizaron para estos cálculos, se realizó en el laboratorio el proceso del “**método gravimétrico modificado (extracción con solvente)**” Anexo B.

Debido a que el número de pruebas que se debían realizar en cada nivel de tiempo eran bastantes, se optó por hacer una pequeña modificación al proceso, se incluyó en los equipos a utilizar una bomba de vacío que lograba agilizar el proceso al momento de separar los residuos sólidos de la fase líquida necesaria para el proceso de decantación y secado. Este proceso lo establece la metodología para acelerar la filtración. Se realizó una corrida del método para probar si la modificación era afectiva y no alteraba la muestra para el resultado final, se tuvieron resultados favorables por lo que se continuó utilizando este equipo en todas las pruebas realizadas durante el proyecto.

#### 5.3.1 Pruebas a tiempo 0 realizadas a las eras de landfarming

Estos valores se obtienen luego de realizar la primera evaluación en los laboratorios de química de la Universidad Surcolombiana. Se lleva a cabo la prueba el mismo día que se realizó la mezcla del contaminante, suelo y el abono. Es decir es la prueba de tiempo 0

**Tabla 10: Resultados de la prueba a t=0.**

| Era | Abono (g) | Suelo (g) | Hcs (g) | Peso cápsula vacía | Peso cápsula con Hcs | Hcs   | %TPH t=0 |
|-----|-----------|-----------|---------|--------------------|----------------------|-------|----------|
| 1   | 6803.88   | 6803.88   | 408.24  | 99.6546            | 99.6861              | 0.031 | 3.1      |
| 2   | -         | 6803.88   | 408.24  | 56.0711            | 56.1021              | 0.031 | 3.1      |
| 3   | 6803.88   | 6803.88   | 408.24  | 99.6565            | 99.6869              | 0.030 | 3.0      |
| 4   | -         | 6803.88   | 408.24  | 56.0722            | 56.1033              | 0.031 | 3.1      |
| 5   | 6803.88   | 6803.88   | 680.40  | 56.0728            | 56.1221              | 0.049 | 4.9      |
| 6   | -         | 6803.88   | 680.40  | 99.6567            | 99.707               | 0.050 | 5.0      |
| 7   | 6803.88   | 6803.88   | 680.40  | 56.0538            | 56.105               | 0.051 | 5.1      |
| 8   | -         | 6803.88   | 680.40  | 99.6546            | 99.705               | 0.050 | 5.0      |

|    |         |         |         |         |         |       |      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------|
| 9  | 6803.88 | 6803.88 | 1360.80 | 99.6568 | 99.7569 | 0.100 | 10.0 |
| 10 | -       | 6803.88 | 1360.80 | 56.0726 | 56.1729 | 0.100 | 10.0 |
| 11 | 6803.88 | 6803.88 | 1360.80 | 99.6565 | 99.7559 | 0.099 | 9.9  |
| 12 | -       | 6803.88 | 1360.80 | 56.0538 | 56.1553 | 0.101 | 10.1 |

➤ **Muestra de cálculo**

- Al iniciar el proceso de biorremediación se presenta un fenómeno de dilución, esto se debe al contacto del contaminante con la mezcla suelo:abono; debido a los nutrientes y microorganismos que estos presentan generan una reducción inmediata en la carga contaminante proveniente del crudo.
- Cabe aclarar que este fenómeno se presenta solo en las eras que contienen agente biorremediador (abono).

**Tabla 11: Resultados de la prueba de %TPH en dilución.**

| <b>Era</b> | <b>Abono (g)</b> | <b>Suelo (g)</b> | <b>Hcs (g)</b> | <b>% TPH Inicial</b> | <b>% TPH en Dilución</b> |
|------------|------------------|------------------|----------------|----------------------|--------------------------|
| 1          | 6803.88          | 6803.88          | 408.24         | 3                    | 2.9127                   |
| 2          | -                | 6803.88          | 408.24         | 3                    | -                        |
| 3          | 6803.88          | 6803.88          | 408.24         | 3                    | 2.9127                   |
| 4          | -                | 6803.88          | 408.24         | 3                    | -                        |
| 5          | 6803.88          | 6803.88          | 680.40         | 5                    | 4.7620                   |
| 6          | -                | 6803.88          | 680.40         | 5                    | -                        |
| 7          | 6803.88          | 6803.88          | 680.40         | 5                    | 4.7620                   |
| 8          | -                | 6803.88          | 680.40         | 5                    | -                        |
| 9          | 6803.88          | 6803.88          | 1360.80        | 10                   | 9.0911                   |
| 10         | -                | 6803.88          | 1360.80        | 10                   | -                        |
| 11         | 6803.88          | 6803.88          | 1360.80        | 10                   | 9.0911                   |
| 12         | -                | 6803.88          | 1360.80        | 10                   | -                        |

➤ **Muestra de cálculo para 3%**

➤ **Muestra de cálculo para 5%**

➤ **Muestra de cálculo para 10%**

### 5.3.2 Prueba a tiempo t=15 realizada a las eras de landfarming

La prueba se realizó a los 15 días cumplidos del tratamiento, esto con el fin de evaluar cómo se está comportando la mezcla y tener una referencia de si el proceso está siendo efectivo o no.

**Tabla 12: Resultados de la prueba a t=15.**

| <b>Era</b> | <b>Hcs (g)</b> | <b>% TPH Inicial</b> | <b>% TPH en Dilución</b> | <b>Peso cápsula vacía</b> | <b>Peso cápsula con Hcs</b> | <b>Hcs</b> | <b>%TPH t=15</b> |
|------------|----------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------|------------------|
| 1          | 408.24         | 3                    | 2.9127                   | 56.054                    | 56.0825                     | 0.0285     | 2.85             |
| 2          | 408.24         | 3                    | 3                        | 99.6549                   | 99.6845                     | 0.0296     | 2.96             |
| 3          | 408.24         | 3                    | 2.9127                   | 55.4739                   | 55.5021                     | 0.0282     | 2.82             |
| 4          | 408.24         | 3                    | 3                        | 99.6569                   | 99.6867                     | 0.0298     | 2.98             |
| 5          | 680.40         | 5                    | 4.7620                   | 56.0728                   | 56.1198                     | 0.047      | 4.70             |
| 6          | 680.40         | 5                    | 5                        | 55.4736                   | 55.523                      | 0.0494     | 4.94             |
| 7          | 680.40         | 5                    | 4.7620                   | 56.3354                   | 56.3821                     | 0.0467     | 4.67             |
| 8          | 680.40         | 5                    | 5                        | 56.4227                   | 56.4723                     | 0.0496     | 4.96             |
| 9          | 1360.80        | 10                   | 9.0911                   | 55.4752                   | 55.5659                     | 0.0907     | 9.07             |
| 10         | 1360.80        | 10                   | 10                       | 55.4713                   | 55.571                      | 0.0997     | 9.97             |
| 11         | 1360.80        | 10                   | 9.0911                   | 56.3354                   | 56.4259                     | 0.0905     | 9.05             |
| 12         | 1360.80        | 10                   | 10                       | 99.657                    | 99.7569                     | 0.0999     | 9.99             |

➤ **Muestra de cálculo**

**Se repite el mismo procedimiento que se enseña en la muestra de cálculo para todas las muestras en todos los tiempos evaluados.**

**5.3.3 Prueba a tiempo t=30 realizada a las eras de landfarming**

Esta prueba se realiza a los 30 días de iniciado el tratamiento; ya es un mes entero de proceso donde se han ido controlando los factores y luego de realizar el laboratorio se puede ir definiendo una tendencia en el comportamiento de las Eras.

**Tabla 13: Resultados de la prueba a t=30.**

| <b>Era</b> | <b>Hcs (g)</b> | <b>% TPH Inicial</b> | <b>% TPH en Dilución</b> | <b>Peso cápsula vacía</b> | <b>Peso cápsula con Hcs</b> | <b>Hcs</b> | <b>%TPH t=30</b> |
|------------|----------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------|------------------|
| 1          | 408.24         | 3                    | 2.9127                   | 55.4744                   | 55.4994                     | 0.025      | 2.5              |
| 2          | 408.24         | 3                    | 3                        | 56.3357                   | 56.3647                     | 0.029      | 2.9              |
| 3          | 408.24         | 3                    | 2.9127                   | 55.4756                   | 55.5004                     | 0.0248     | 2.48             |
| 4          | 408.24         | 3                    | 3                        | 56.3377                   | 56.3671                     | 0.0294     | 2.94             |
| 5          | 680.40         | 5                    | 4.7620                   | 55.471                    | 55.516                      | 0.045      | 4.5              |
| 6          | 680.40         | 5                    | 5                        | 56.4091                   | 56.4581                     | 0.049      | 4.9              |
| 7          | 680.40         | 5                    | 4.7620                   | 55.4722                   | 55.5162                     | 0.044      | 4.4              |
| 8          | 680.40         | 5                    | 5                        | 56.3352                   | 56.3845                     | 0.0493     | 4.93             |
| 9          | 1360.80        | 10                   | 9.0911                   | 55.4718                   | 55.5593                     | 0.0875     | 8.75             |
| 10         | 1360.80        | 10                   | 10                       | 56.4224                   | 56.5216                     | 0.0992     | 9.92             |
| 11         | 1360.80        | 10                   | 9.0911                   | 55.4742                   | 55.5609                     | 0.0867     | 8.67             |
| 12         | 1360.80        | 10                   | 10                       | 55.4738                   | 55.5732                     | 0.0994     | 9.94             |

➤ **Muestra de cálculo**

### 5.3.4 Prueba a tiempo t=45 realizada a las eras de landfarming

La cuarta prueba realizada se efectuó a los 45 días del proceso para evaluar como estaba actuando el abono, si los parámetros seguían estando dentro de los límites pues ya se cumplía mes y medio de proceso y cualquier cambio podría resultar significativo.

**Tabla 14: Resultados de la prueba a t=45.**

| Era | Hcs (g) | % TPH Inicial | % TPH en Dilución | Peso cápsula vacía | Peso cápsula con Hcs | Hcs    | %TPH t=45 |
|-----|---------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------|-----------|
| 1   | 408.24  | 3             | 2.9127            | 55.4742            | 55.4937              | 0.0195 | 1.95      |
| 2   | 408.24  | 3             | 3                 | 56.0538            | 56.0823              | 0.0285 | 2.85      |
| 3   | 408.24  | 3             | 2.9127            | 55.4744            | 55.4944              | 0.02   | 2         |
| 4   | 408.24  | 3             | 3                 | 56.3354            | 56.3644              | 0.029  | 2.9       |
| 5   | 680.40  | 5             | 4.7620            | 99.657             | 99.6966              | 0.0396 | 3.96      |
| 6   | 680.40  | 5             | 5                 | 56.0726            | 56.1213              | 0.0487 | 4.87      |
| 7   | 680.40  | 5             | 4.7620            | 99.6565            | 99.6964              | 0.0399 | 3.99      |
| 8   | 680.40  | 5             | 5                 | 56.4091            | 56.4581              | 0.049  | 4.9       |
| 9   | 1360.80 | 10            | 9.0911            | 99.6565            | 99.7402              | 0.0837 | 8.37      |
| 10  | 1360.80 | 10            | 10                | 99.6546            | 99.7534              | 0.0988 | 9.88      |
| 11  | 1360.80 | 10            | 9.0911            | 56.0728            | 56.1552              | 0.0824 | 8.24      |
| 12  | 1360.80 | 10            | 10                | 55.4736            | 55.5727              | 0.0991 | 9.91      |

➤ **Muestra de cálculo**

### 5.3.5 Prueba a tiempo t=60 realizada a las eras de landfarming

Esta prueba de laboratorio se corrió cumplidos los dos meses de tratamiento en la planta de landfarming, de nuevo utilizando el laboratorio de química de la Universidad Surcolombiana. Observando la tabla de los resultados es posible ver la tendencia que se marco durante el proceso.

**Tabla 15: Resultados de la prueba a t=60.**

| Era | Hcs (g) | % TPH Inicial | % TPH en Dilución | Peso cápsula vacía | Peso cápsula con Hcs | Hcs    | %TPH t=60 |
|-----|---------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------|-----------|
| 1   | 408.24  | 3             | 2.9127            | 56.3355            | 56.3475              | 0.012  | 1.2       |
| 2   | 408.24  | 3             | 3                 | 55.4737            | 55.5021              | 0.0284 | 2.84      |
| 3   | 408.24  | 3             | 2.9127            | 55.474             | 55.488               | 0.014  | 1.4       |
| 4   | 408.24  | 3             | 3                 | 56.4227            | 56.4515              | 0.0288 | 2.88      |
| 5   | 680.40  | 5             | 4.7620            | 56.3351            | 56.3669              | 0.0318 | 3.18      |
| 6   | 680.40  | 5             | 5                 | 56.4091            | 56.4575              | 0.0484 | 4.84      |
| 7   | 680.40  | 5             | 4.7620            | 55.4712            | 55.505               | 0.0338 | 3.38      |
| 8   | 680.40  | 5             | 5                 | 56.3352            | 56.3839              | 0.0487 | 4.87      |
| 9   | 1360.80 | 10            | 9.0911            | 55.4713            | 55.545               | 0.0737 | 7.37      |
| 10  | 1360.80 | 10            | 10                | 56.409             | 56.5074              | 0.0984 | 9.84      |
| 11  | 1360.80 | 10            | 9.0911            | 56.0536            | 56.1277              | 0.0741 | 7.41      |
| 12  | 1360.80 | 10            | 10                | 55.4742            | 55.5729              | 0.0987 | 9.87      |

➤ **Muestra de cálculo**



### 5.3.6 Prueba a tiempo t=75 realizada a las eras de landfarming

Este laboratorio es el penúltimo de la serie de pruebas que se tiene estipuladas, a este nivel del proceso ya se tiene un pronóstico de lo que será el proceso al final; se puede ver una mayor remediación que en las pruebas previas.

**Tabla 16: Resultados de la prueba a t=75.**

| Era | Hcs (gr) | % TPH Inicial | % TPH en Dilución | Peso cápsula vacía | Peso cápsula con Hcs | Hcs    | %TPH t=75 |
|-----|----------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------|-----------|
| 1   | 408.24   | 3             | 2.9127            | 56.0726            | 56.0826              | 0.01   | 1         |
| 2   | 408.24   | 3             | 3                 | 56.0538            | 56.082               | 0.0282 | 2.82      |
| 3   | 408.24   | 3             | 2.9127            | 56.0711            | 56.0831              | 0.012  | 1.2       |
| 4   | 408.24   | 3             | 3                 | 56.3354            | 56.3639              | 0.0285 | 2.85      |
| 5   | 680.40   | 5             | 4.7620            | 55.4736            | 55.498               | 0.0244 | 2.44      |
| 6   | 680.40   | 5             | 5                 | 55.4744            | 55.5225              | 0.0481 | 4.81      |
| 7   | 680.40   | 5             | 4.7620            | 56.0725            | 56.1012              | 0.0287 | 2.87      |
| 8   | 680.40   | 5             | 5                 | 56.4091            | 56.4577              | 0.0486 | 4.86      |
| 9   | 1360.80  | 10            | 9.0911            | 55.4736            | 55.537               | 0.0634 | 6.34      |
| 10  | 1360.80  | 10            | 10                | 56.0726            | 56.1711              | 0.0985 | 9.85      |
| 11  | 1360.80  | 10            | 9.0911            | 56.0537            | 56.1186              | 0.0649 | 6.49      |
| 12  | 1360.80  | 10            | 10                | 56.3352            | 56.4339              | 0.0987 | 9.87      |

➤ **Muestra de cálculo**

### 5.3.7 Prueba a tiempo t=90 realizada a las eras de landfarming

Con esta práctica se culmina la etapa de pruebas de laboratorio, desde este punto inicia la parte de análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones que sean posibles determinar basado en los cálculos e interpretación de las graficas.

**Tabla 17: Resultados de la prueba a t=90.**

| Era | Hcs (gr) | % TPH Inicial | % TPH en Dilución | Peso cápsula vacía | Peso cápsula con Hcs | Hcs    | %TPH t=90 |
|-----|----------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|--------|-----------|
| 1   | 408.24   | 3             | 2.9127            | 55.4736            | 55.4826              | 0.009  | 0.9       |
| 2   | 408.24   | 3             | 3                 | 56.0728            | 56.1008              | 0.028  | 2.8       |
| 3   | 408.24   | 3             | 2.9127            | 56.3355            | 56.3456              | 0.0101 | 1.01      |
| 4   | 408.24   | 3             | 3                 | 55.4742            | 55.5024              | 0.0282 | 2.82      |
| 5   | 680.40   | 5             | 4.7620            | 55.4737            | 55.4917              | 0.018  | 1.8       |
| 6   | 680.40   | 5             | 5                 | 55.4742            | 55.5222              | 0.048  | 4.8       |
| 7   | 680.40   | 5             | 4.7620            | 56.0725            | 56.0962              | 0.0237 | 2.37      |
| 8   | 680.40   | 5             | 5                 | 56.4091            | 56.4574              | 0.0483 | 4.83      |
| 9   | 1360.80  | 10            | 9.0911            | 55.4736            | 55.5308              | 0.0572 | 5.52      |
| 10  | 1360.80  | 10            | 10                | 56.0726            | 56.1711              | 0.0985 | 9.85      |
| 11  | 1360.80  | 10            | 9.0911            | 56.0537            | 56.1089              | 0.0552 | 5.57      |
| 12  | 1360.80  | 10            | 10                | 56.0538            | 56.1526              | 0.0988 | 9.88      |

➤ **Muestra de cálculo**

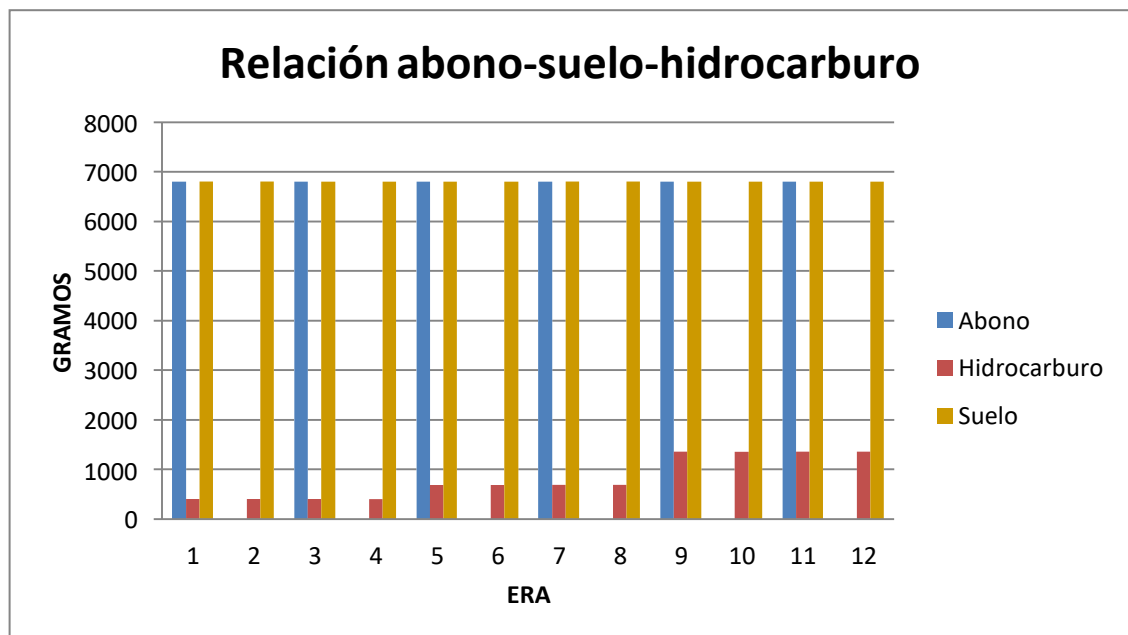
## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 ANÁLISIS DE LAS ERAS

Al momento de iniciar el tratamiento cuando se realiza la mezcla de abono CEAGRODEX con el suelo y posteriormente se contamina con el crudo en sus respectivas cargas según corresponda (3%, 5%, 10%), se genera una dilución inmediata en los niveles de TPH, esto debido a la presencia de microorganismos y de nutrientes tanto en suelo como en abono.

Cabe aclarar que esta dilución solo se presenta en aquellas eras que contienen la mezcla suelo-abono.

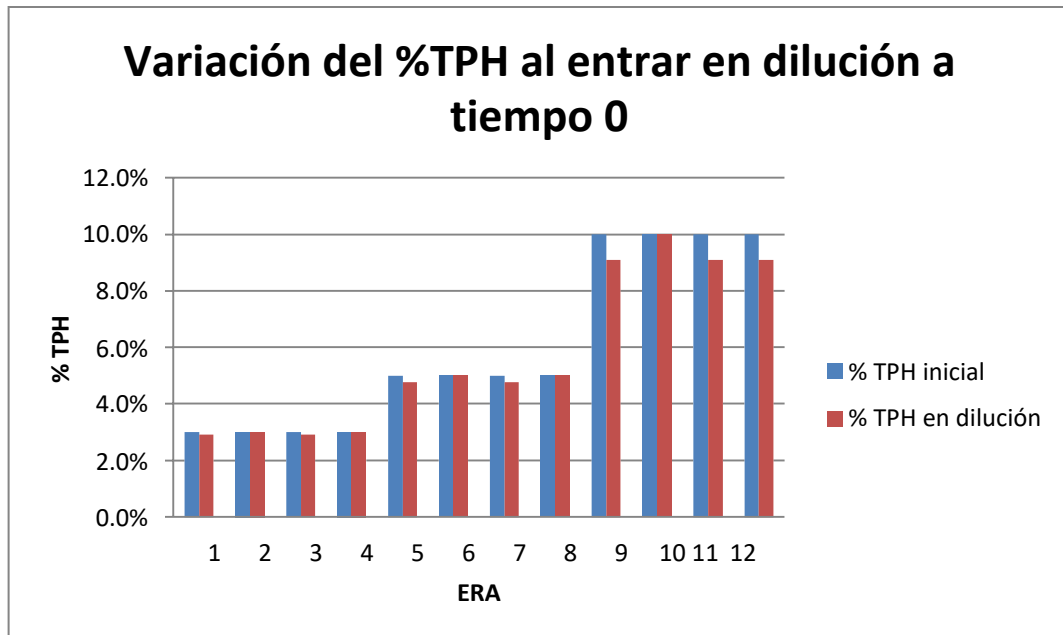
**Grafica 1: Relación abono-suelo-hidrocarburos (g).**



Fuente: Autores

En esta grafica se observa la relación en gramos que existe entre los tres componentes que tenía la mezcla, a pesar de parecer poca la cantidad de hidrocarburos en cada una de las eras, su capacidad contaminante es bastante alta.

**Gráfica 2: Variación del % TPH en dilución**

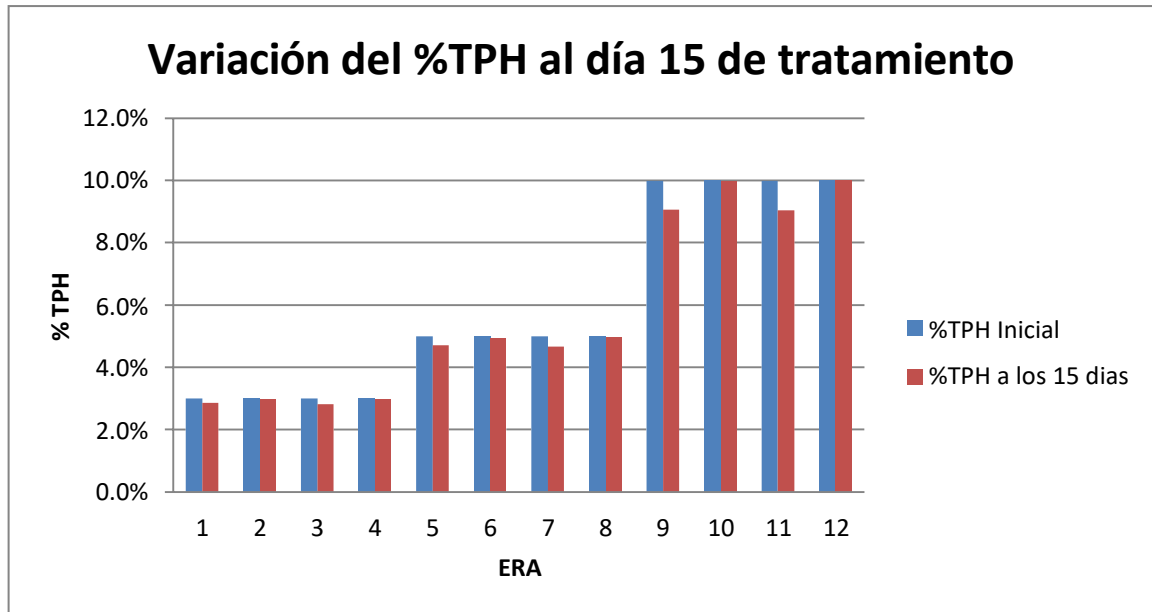


Fuente: Autores

SE observa la dilución que se presenta al instante en que entran en contacto los 3 componentes, dependiendo de cada carga contaminante así mismo es su valor de dilución. Se evidencia también que las eras que no presentan abono, no tienen una dilución instantánea a tiempo 0.

En las gráficas posteriores se puede empezar a evidenciar las disminuciones en los niveles de TPH, lo que confirma que el abono CEAGRODEX si cumple su función como agente biorremediador y como posible candidato en procesos industrializados de landfarming u otro tipo de biorremediación.

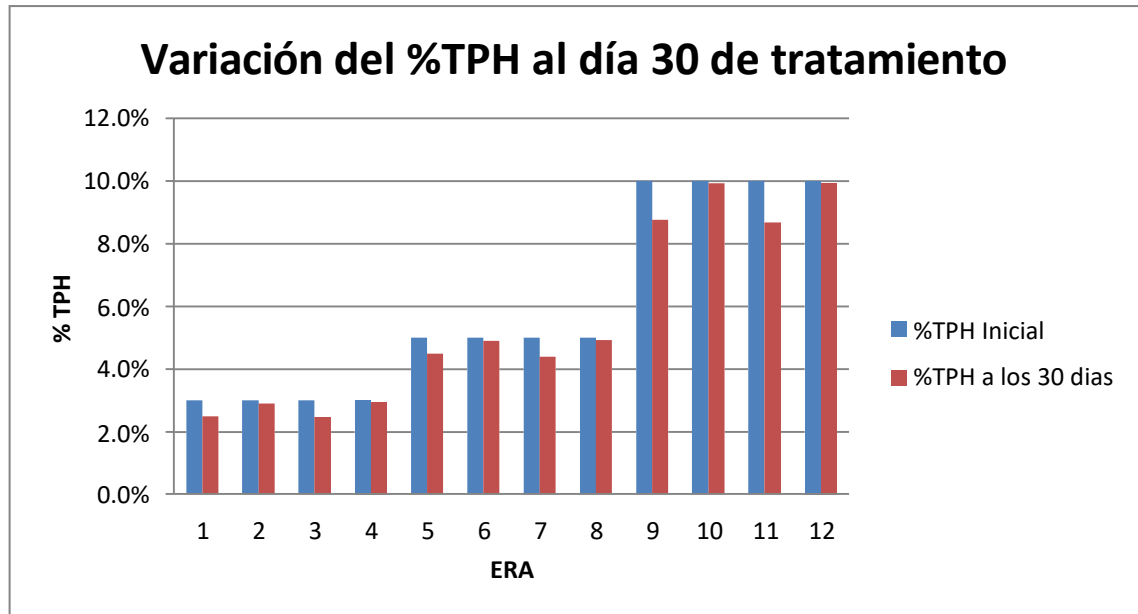
**Gráfica 3: Variación del % TPH a t=15.**



Se genera una reducción en los niveles aunque es mínima, pero en este punto es bueno recordar que para el proyecto se utilizó una relación 1-1 de suelo-abono, por lo que el proceso de biorremediación será más complejo y tardará más en evidenciarse.

- Es notorio que en las Eras de la 5 a la 8, las cuales corresponden a carga contaminante de 5% la reducción es muy baja, mientras que en las de 3%(1-4) y 9% (9-12) el nivel baja en mayor valor.
- También es reconocible que hasta el momento la diferencia de pH entre 7 y 9 no genera ninguna acción drástica, es decir no favorece o afecta en la biorremediación.

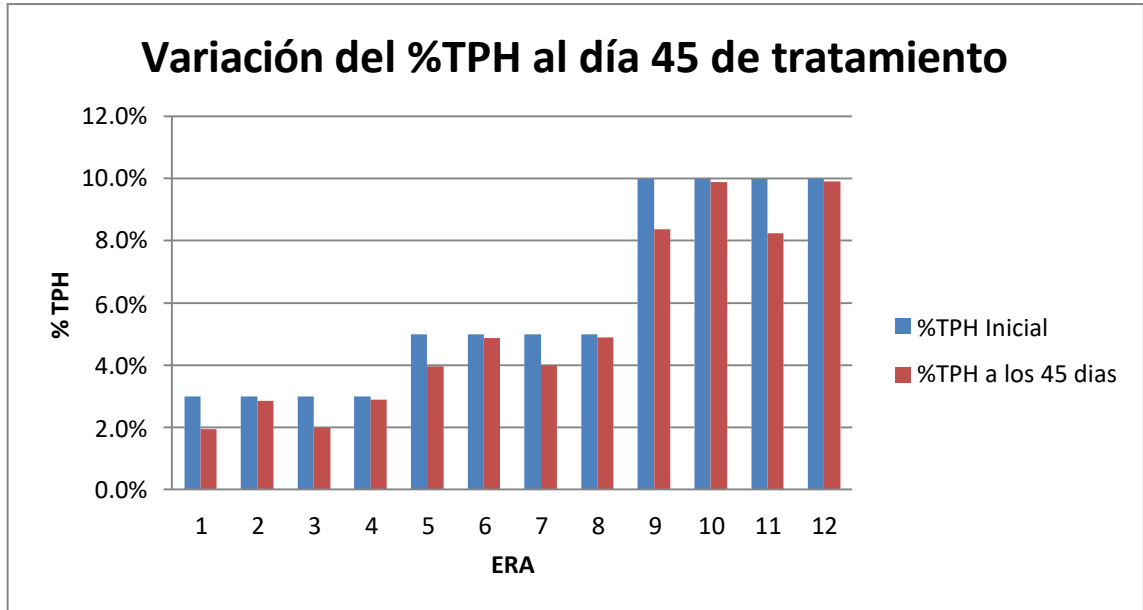
Gráfica 4: Variación del %TPH a t=30.



En este punto ya ha transcurrido un mes de tratamiento, se empiezan a ver cambios un poco mayores pero aun los niveles de reducción no son elevados.

- A pesar de tener la carga contaminante más alta (10%) las eras 9 y 11 están reportando los más altos valores de disminución, 1,25 y 1.33 respectivamente
- En esta ocasión los valores en las eras de 3% y 5% presentan cercanía, lo que muestra que en las primeras se está manteniendo la tendencia de reducción y en las otras empieza a surtir efecto el proceso.

Gráfica 5: Variación del %TPH a t=45.

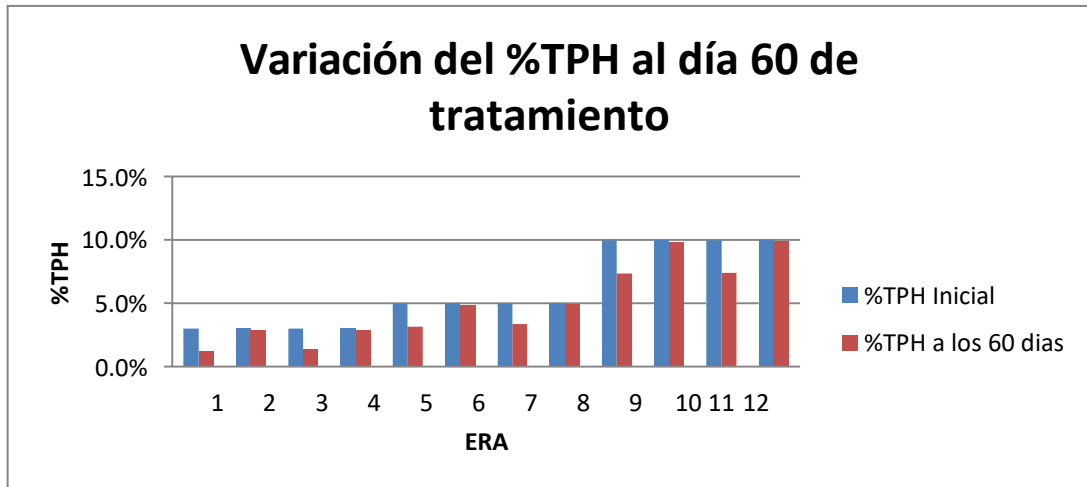


Fuente: Autores

Revisando estos resultados ya es posible notar una clara disminución en los niveles de TPH, se empieza a ver la acción del abono de una manera más notoria y aunque sigue siendo insignificante, se presenta cierta diferencia entre los valores de cada era dependiendo de su pH

- Los niveles de disminución empiezan a igualarse para todas las eras, pero las ultimas de carga 10%, siguen teniendo un poco más alto su valor en disminución.
- Aunque sigue siendo algo mínimo, se presenta una mayor remediación en las eras con pH 7, pero los valores son de décimas.

Gráfica 6: Variación del %TPH a t=60.

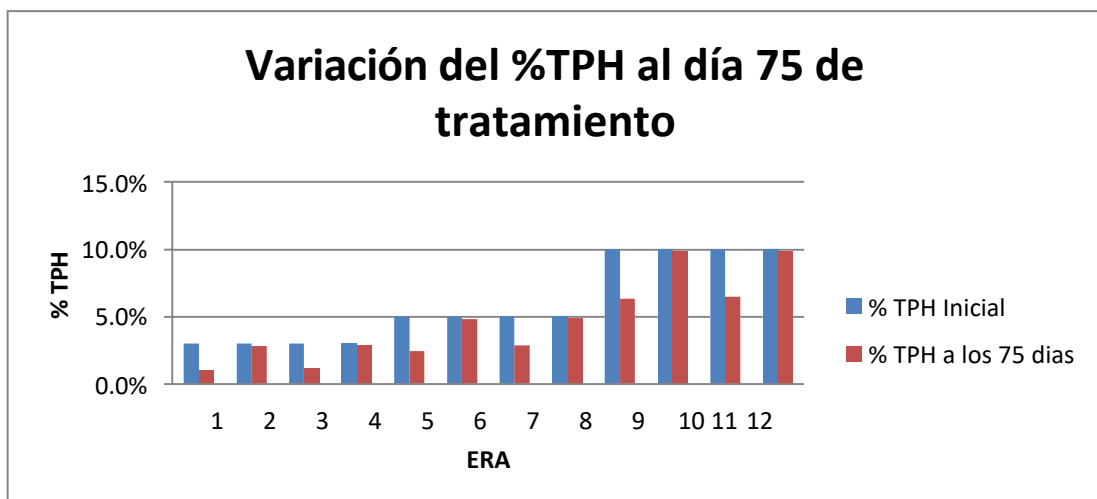


Fuente: Autores

En esta serie ya se puede evidenciar una biorremediación mayor, en las primeras eras se logra alcanzar valores permisibles por la norma Louisiana 29B.

El proceso empieza a trabajar de manera más notoria a partir de este tiempo, parece que es una etapa de mayor remediación, quizá porque el abono ha entrado totalmente en contacto con las partículas contaminante.

Gráfica 7: Variación del %TPH a t=75.

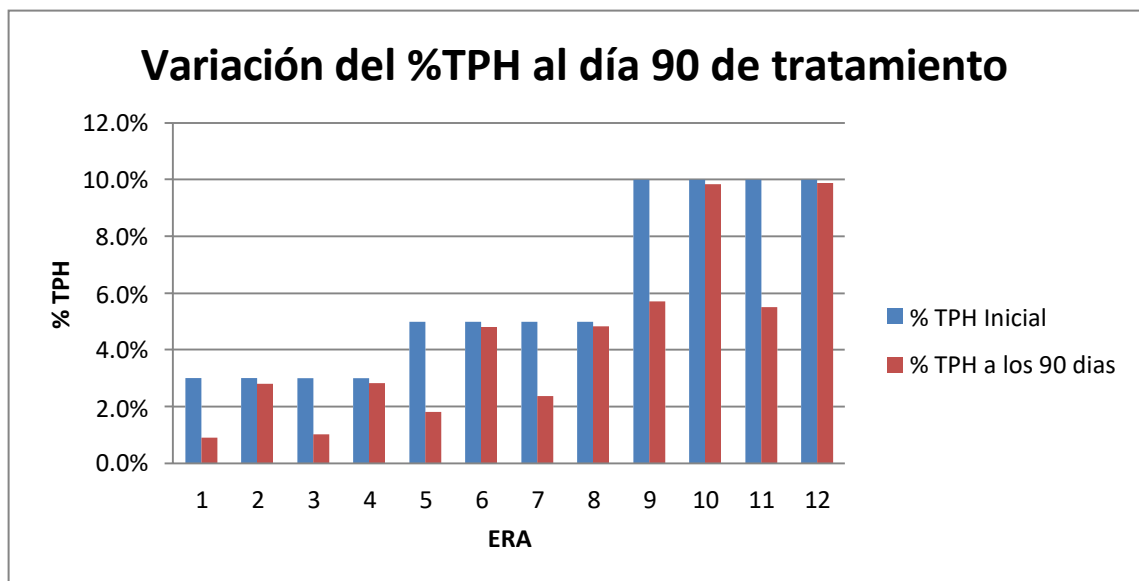




En esta etapa del tratamiento es notoria la mejora que tuvo el proceso en cuanto a remoción de contaminante, los valores son mucho menores y se puede pronosticar resultados muy exitosos.

- Más de la mitad de las eras que contienen abono logran estar bajo la norma que rige a Colombia
- El proceso demostró ser más efectivo para los rangos de tiempo elevados, las diferencias de remoción entre este y tiempo menores son mucho mas grandes
- A pesar de no estar bajo límites permisibles se sigue observando muy buena remediación en las ultimas eras, seguidas por las de carga media (5%).

**Gráfica 8: Variación del %TPH a t=90.**

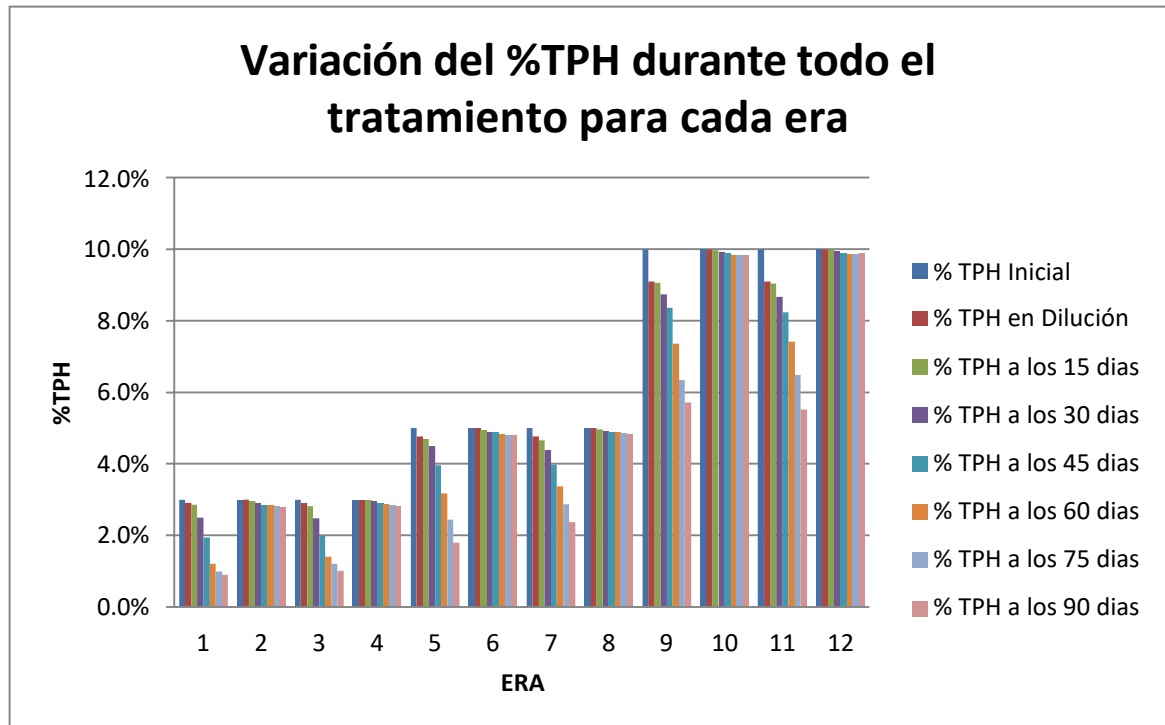


Fuente: Autores

Siendo esta la última prueba realizada, es posible considerar que el proceso resulto exitoso, a pesar de que faltan 2 eras por alcanzar el límite que estipula la norma Luisiana 29B, que corresponden a la era 9 y 11; se mencionan que son las que no entraron porque de la serie de eras que tenían abono, son las únicas dos que no han llegado a límites permitidos aun.

- Se evidencian niveles muy bajos, en las eras de carga mínima y media como era de esperarse.
- Aunque contenían un muy alto porcentaje de contaminación las eras 9 y 11 presentaron disminuciones muy elevadas.

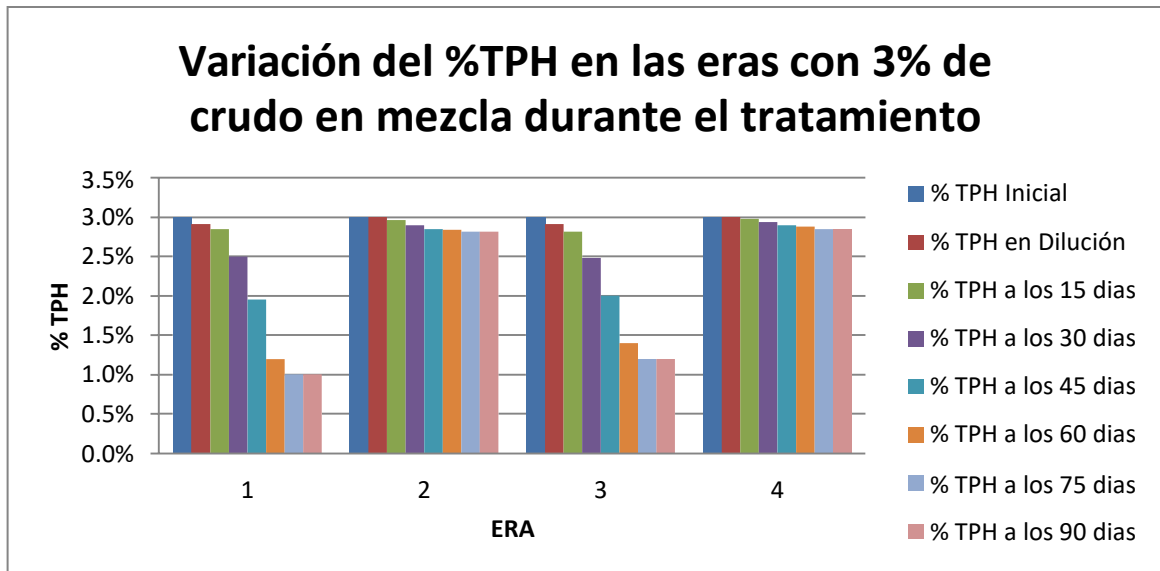
**Gráfica 9: Variación del %TPH para cada era.**



En esta gráfica se observa un comparativo de cada era durante el transcurso de todo el tratamiento, se observa cómo las eras que no contenían abono (2, 4, 6, 8, 10, 12) mantienen valores casi iguales durante todo el tiempo; por el contrario se observan disminuciones muy marcadas en el resto de eras, mayormente en los tiempos finales.

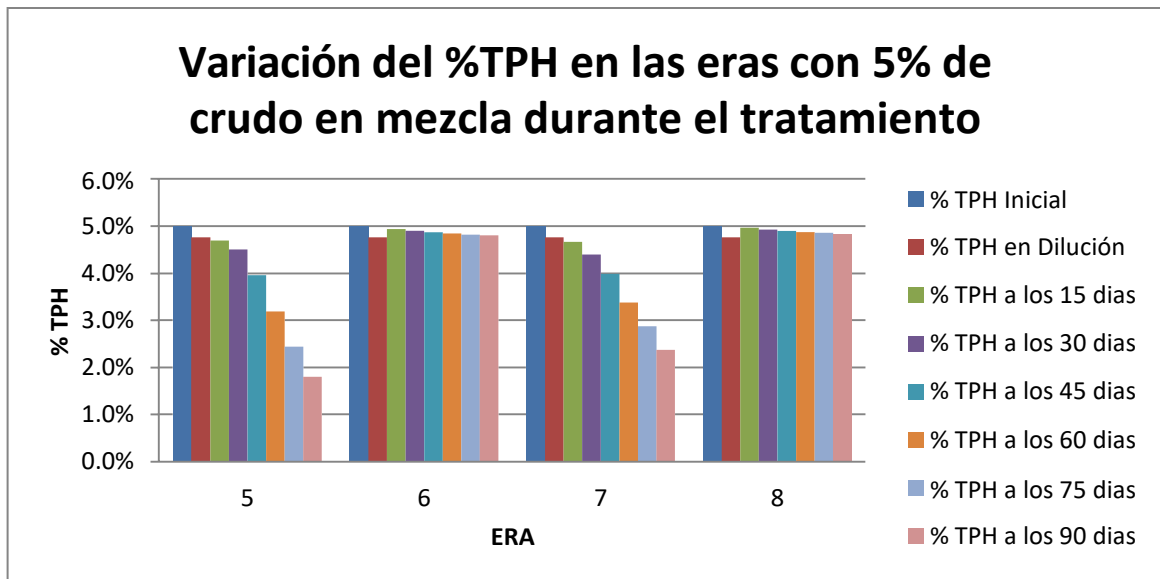
En las siguientes graficas se podrán observar con mayor detalle los resultados

Gráfica 10: Variación del %TPH en eras con carga contaminante de 3%.



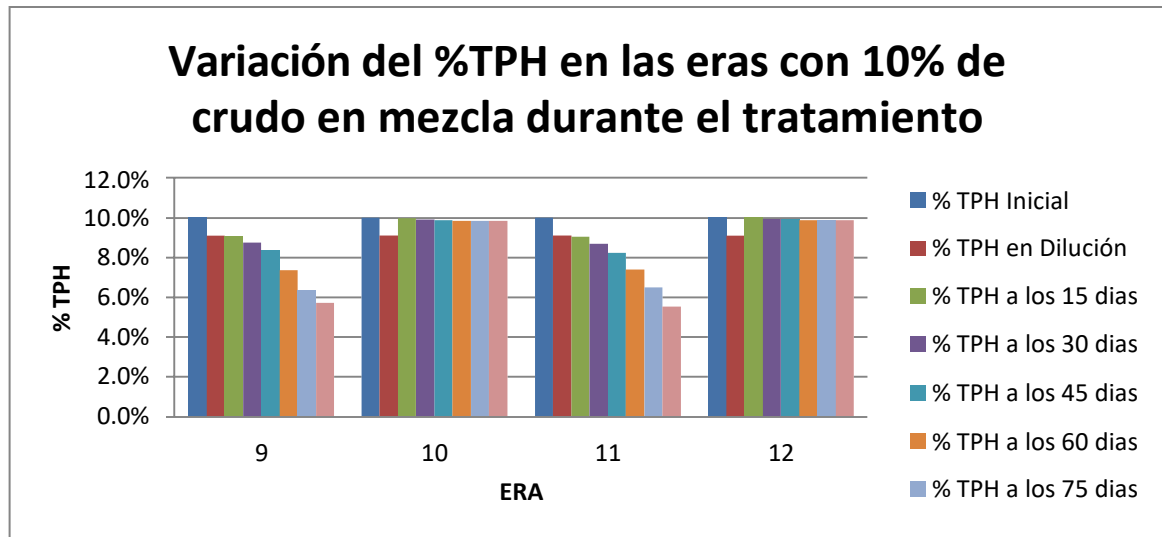
Fuente: Autores

Gráfica 11: Variación del %TPH en eras con carga contaminante de 5%.



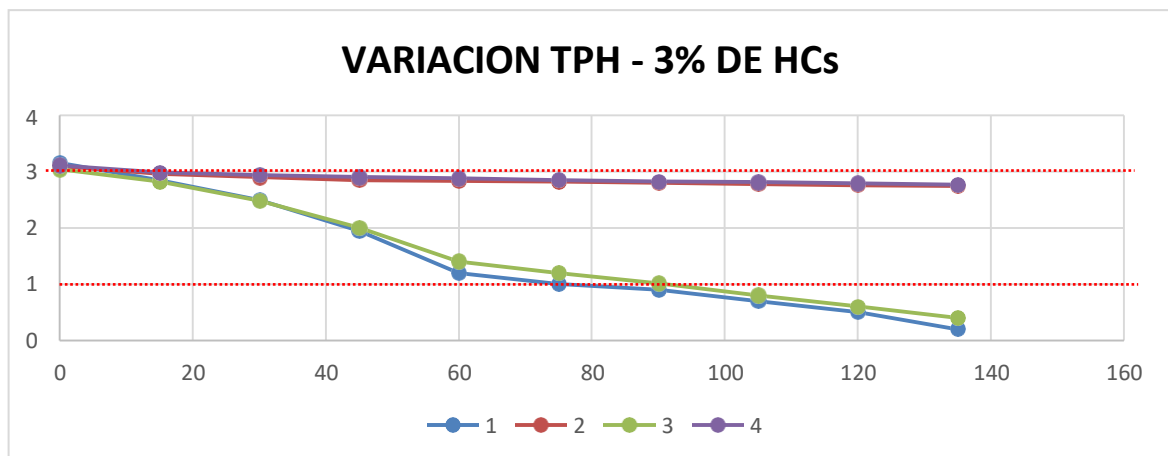
Fuente: Autores

Gráfica 12: Variación del %TPH en eras con carga contaminante de 10%.



Fuente: Autores

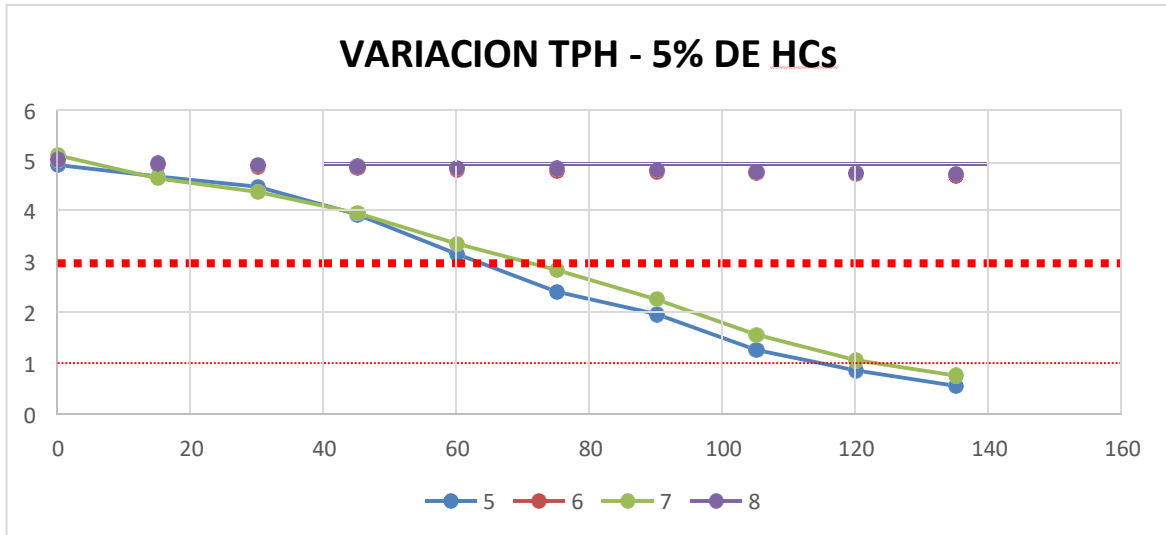
Gráfica 13: Variación de TPH en eras con carga contaminante de 3%.



Fuente: Autores

- En la grafica se puede evidenciar como al pasar el tiempo durante el proyecto se presenta una mayor biorremediación en cada una de las eras.
- Se puede concluir que luego de los 90 días las eras ya cumplían con la normativa ambiental dispuesta por API.
- Es notable que las eras que no presentan abono mantienen un comportamiento casi constante al pasar el tiempo.

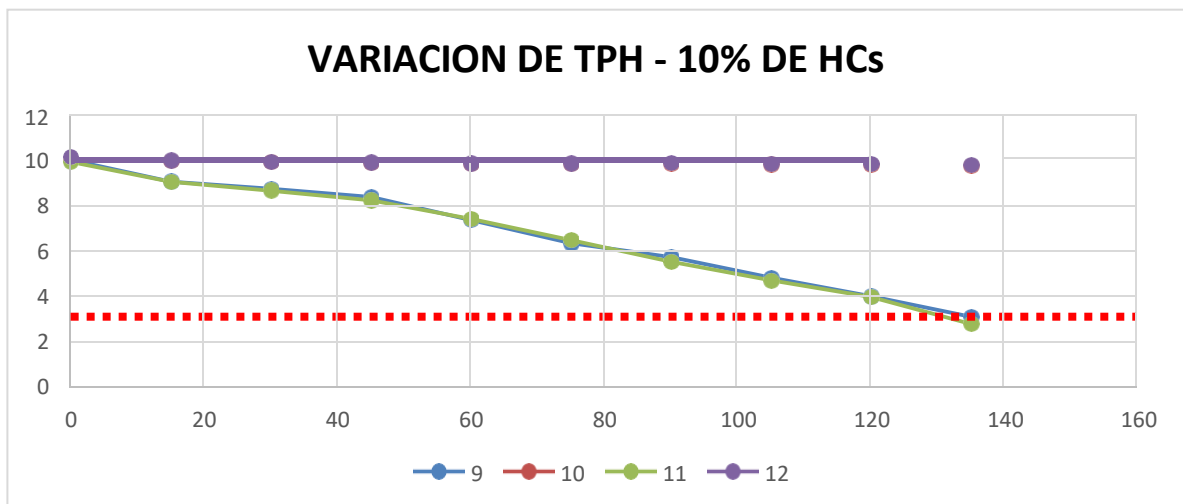
Gráfica 14: Variación de TPH en eras con carga contaminante 5%.



Fuente: Autores

- En esta grafica se podría hablar de una similitud con los datos de 3% pues también se presentan picos de remediación mas marcados luego de los 60 días.
- De nuevo se ve que las eras que no presentan abono tienen un comportamiento casi constante donde la disminucion de TPH es mínima.

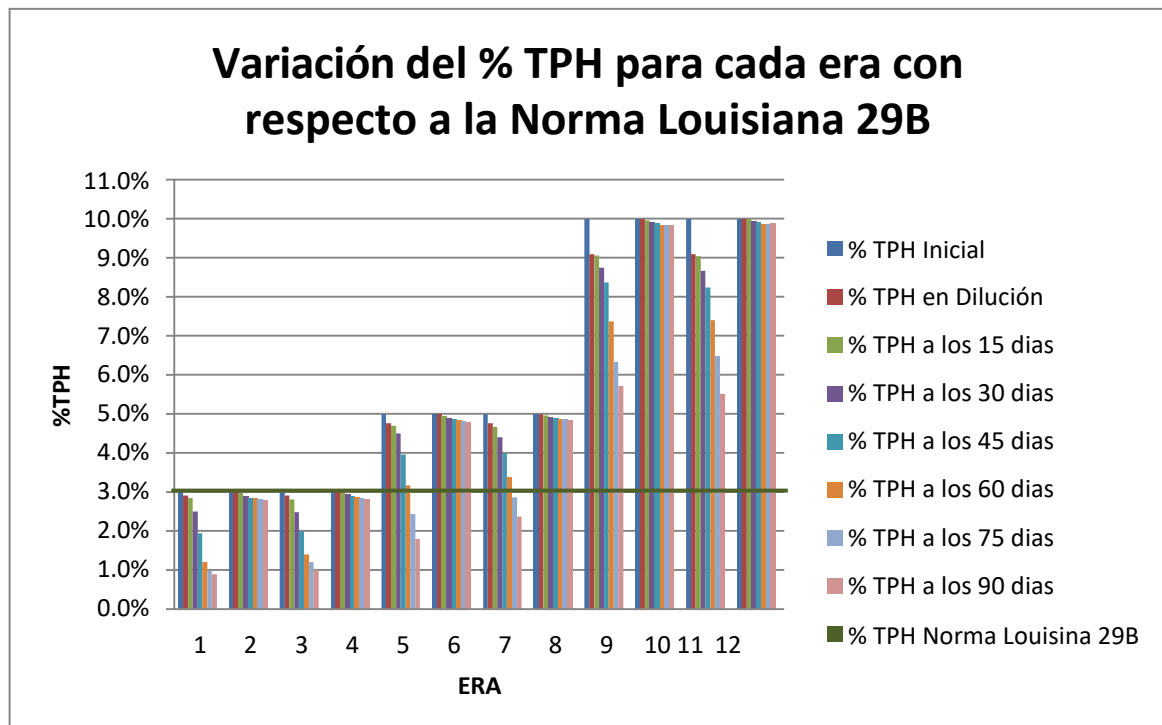
Gráfica 15: Variación de TPH en eras con carga contaminante de 10%.



Fuente: Autores

- En esta serie de datos se evidencian como las eras con mayor contaminación presentaron una remediación más lenta, tomaron más tiempo para alcanzar valores permitidos por la norma.
- Se sigue presentando el mismo fenómeno donde las eras de números pares no presentan gran porcentaje de remoción.

**Gráfica 16: Variación del % TPH respecto a la norma Louisiana 29B.**



Fuente: Autores

- Esta gráfica se presenta como una manera de entender a lo que quería llegarse y qué tan favorable fue el proceso, las condiciones que allí se plasman son las que presenta la norma Luisiana 29B que expresa como limite un TPH de 3%
- En la última grafica se puede evidenciar que hasta el tiempo de 60 días, solo las 4 primeras eras cumplían con la norma.

- A término del proyecto la mayor parte del grupo evaluado logró niveles permisibles, lo que resulta satisfactorio y genera una nueva ventana de investigación en la industria y en la academia.
- Es necesario mencionar en este punto que los procesos en masa o industrializados de Landfarming u otro tipo de biorremediación, generalmente abarcan tiempos mayores a 4 meses.

La tabla numero 18 presenta los porcentajes de eficiencia de remoción de contaminante en cada era de landfarming, donde se puede notar que los valores más altos corresponden a las primeras eras cuyas cargas contaminantes eran menores (3 y 5%).

Se debe resaltar que aunque poseen altos niveles de contaminación las ultimas eran alcanzaron porcentajes muy buenos para los limites de tiempo trabajados.

**Tabla 18: Eficiencia de remoción en cada era**

| Era | Eficiencia de Remoción |
|-----|------------------------|
| 1   | 70%                    |
| 2   | 6.67%                  |
| 3   | 66.3%                  |
| 4   | 6.0%                   |
| 5   | 64.0%                  |
| 6   | 4.0%                   |
| 7   | 52.6%                  |
| 8   | 3.4%                   |
| 9   | 42.8%                  |
| 10  | 1.5%                   |
| 11  | 44.8%                  |
| 12  | 1.2%                   |

## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Cuando se ideó este proyecto se formuló con la premisa de que además de realizarse un estudio técnico de las concentraciones de TPH en las diferentes eras, también se realizaría una evaluación económica que permite tener un referente sobre la verdadera y completa favorabilidad del abono de la empresa CEAGRODEX, pues hay que recordar que para procesos de landfarming y biorremediación en general, no prima solo el hecho de disminuir la contaminación sino que también es relevante a que costo se genera este factor.

Es necesario mencionar que fue muy difícil realizar una evaluación económica idónea, pues gran parte de las empresas privadas que se dedican a trabajar con procesos de biorremediación o que comercializan los productos para estas prácticas son muy renuentes a publicar o compartir tanto las características de sus productos como sus precios, sobre todo si no están totalmente seguros de que estos serán adquiridos.

Por esta razón y para poder tener diferentes comparativos, algunos de los productos que se mencionaran tendrán precios tentativos basados en referencias de terceras personas o en los valores generales en el mercado. Dichos valores se denotaran con un asterisco (\*) para tener claridad en los datos.

### 7.1 EMPRESAS COLOMBIANAS QUE REALIZAN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN

- PETROLABIN LTDA: Manejo de residuos propios de la industria del petróleo (bio-remediación de lodos, estabilización de lodos petroleros, lavado químico de lodos, des-adsorción térmica, recuperación de crudos partiendo de lodos residuales petroleros, asesorías sobre manejo de residuos especiales).
- ATP Ingeniería LTDA: Biorremediación y/o Landfarming estimulado.
- Total waste management LTDA–TWM: Biorremediación de suelos contaminados.
- GEOAMBIENTAL LTDA: Biorremediación de suelos contaminados.
- PUJAR LTDA: Biorremediación de suelos contaminados con Hidrocarburos.



## 7.2 EMPRESAS COLOMBIANAS QUE COMERCIALIZAN BIORREMEDIADORES

- SEPTITRIM
- BIOMERK
- BIODYNE
- CEAGRODEX

**Tabla 19: Presentaciones y precios de productos.**

| Producto         | Presentación  | Precio (COP)  |
|------------------|---------------|---------------|
| Septitrim grasas | 1 gramo       | \$3.2         |
| BiomerK Hc 85    | 1 gramo       | \$4.8         |
| BiomerK Hc 906   | 1 gramo       | \$1           |
| Abono Ceagrodex  | 1 gramo       | \$0.36-\$0.40 |
| Biodyne 101      | 1 gramo aprox | \$2.1         |

Fuente: Autores

**Tabla 20: Valores finales para el proyecto.**

| Producto         | Presentación  | Precio por gramo | Gramos necesarios | Precio final para el proyecto |
|------------------|---------------|------------------|-------------------|-------------------------------|
| Septitrim grasas | 1 gramo       | \$3.2            | 40824.00          | \$ 130.636.8                  |
| BiomerK Hc 85    | 1 gramo       | \$4.8            | 40824.00          | \$ 195.955.2                  |
| BiomerK Hc 906   | 1 gramo       | \$1              | 40824.00          | \$ 40.824                     |
| Abono Ceagrodex  | 1 gramo       | \$0.36-\$0.40    | 40824.00          | \$ 16,329.60                  |
| Biodyne 101      | 1 gramo aprox | \$2.1            | 40824.00          | \$ 85.730.4                   |

Fuente: Autores

- Como se puede observar claramente la mejor opción para un proceso efectivo y económico es el abono de la empresa CEAGRODEX
- Cabe aclarar que esta comparación solo está hecha para referencias de peso, más no otros factores.

### 7.3 COMPARACIÓN DEL PROCESO CONTRA TECNICAS USADAS COMUNMENTE EN LA INDUSTRIA

Para realizar una comparación entre el abono utilizado y otros procesos usados generalmente en la industria para este tipo de tratamientos, se consulto la teoría y se encontraron dos técnicas con distintas sustancias. Aunque es muy difícil conocer su composición exacta por motivos empresariales, se logro encontrar precios aproximados por Kg de sustancia y los porcentajes de remoción aproximados. Se explicaran brevemente y se nombraran “**tratamiento químico**” y “**Tratamiento de bioestimulación**”.

- **Tratamiento químico:** típicamente involucra reacciones de oxidación-reducción (redox) que convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos menos tóxicos o no peligrosos que son más estables, menos móviles o inertes. Esta sustancia se basa en una mezcla de agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, hipocloritos, cloro, dióxido de cloro y el reactivo de Fenton, a estos se les adicionan pool bacterianos especiales para degradación de hidrocarburos que contienen pseudomonas y Bacilus. Este método puede aplicarse in situ o ex situ en suelos, lodos, sedimentos y otros sólidos (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002)

**Costos y tiempos de remediación:** Actúa de corto a mediano plazo (100 a 170 días) con un porcentaje de remoción exitoso entre 70% y 90%, cuyos costos oscilan los 8.5 USD/Kg (Van Deuren, Wang, & Ledbetter, 1997).

- **Tratamiento de bioestimulación:** Consiste en la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos in situ. (Van Deuren, Wang, & Ledbetter, 1997)(Alexander M. , Biodegradation and

Bioremediation, 1999) (Eweis, Ergas, Chang, & E., 1999) (Semple, Reid, & Fermor, 2001).

**Cotos y tiempos de remediación:** Puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses (de 2 a 5 meses) con porcentajes de remoción entre 60 y 80%. Los costos típicos se encuentran en 2.8 USD/Kg (Riser-Roberts 1998).

Se confrontan los procesos teniendo en cuenta que la medida será 1 tonelada de suelo contaminado con hidrocarburo y según lo consultado se exponen los precios y los porcentajes de remoción aproximados de cada técnica.

- Se pasan los precios a pesos colombianos usando como referencia el precio del dólar en un valor promedio de 2.900 pesos.

### **Tratamiento químico**

### **Tratamiento de bioestimulación**

- Llevando estos valores a una tonelada serian:

### **Tratamiento químico**

### **Tratamiento de bioestimulación**

Retomando los valores anteriormente expuestos en la tabla 19 sobre el costo por gramo de abono Ceagrodex y llevándolo a tonelada seria:

### **Landfarming con abono Ceagrodex**

| <b>Técnica</b>                  | <b>Precio * Tonelada</b> | <b>% Remoción aproximados</b> | <b>Tiempo aproximado</b> |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Tratamiento químico             |                          | 70% y 90%                     | 100 a 170 días           |
| Tratamiento de bioestimulación  |                          | 60% y 80%.                    | 60 a 150 días            |
| Landfarming con abono Ceagrodex |                          | 60%-80%                       | 90 a 120 días            |

Como se puede observar, al realizar una comparación con los procesos y productos más utilizados en la industria para este tipo de procesos de biorremediación, el abono Ceagrodex demuestra tener un mejor rendimiento tanto técnico como económico al restablecer las condiciones naturales de un suelo afectado con hidrocarburos.

Para finalizar la evaluación se puede decir que sin duda la empresa CEAGRODEX tiene un gran potencial con su abono, pues puede ser una herramienta para diversas actividades en el área de la biorremediación, probando que da resultados, que es una alternativa 100% natural, orgánica, amigable con el ambiente, seguro y sano para las personas que entran en contacto con él, además que es de un muy bajo costo, lo que la sobrepone sobre muchas otras opciones, por su relación costo beneficio.

Esto abre una ventana de posibilidades para la industria en materia de investigación y de solución de problemas a un bajo costo tanto económico como ambiental; también puede verse como una herramienta de desarrollo en momentos donde la industria está siendo golpeada en y los profesionales jóvenes buscamos un espacio para desempeñarnos y crecer profesionalmente.

## 8. CONCLUSIONES

- Se realizó la medición del porcentaje total de hidrocarburos, desde el tiempo cero a noventa días y como medida de control para las eras que no cumplieron con la normativa ambiental, se continuó haciendo mediciones hasta alcanzar un TPH inferior o igual al 3%, alrededor de los 135 días.
- Las eras con mayor eficiencia de remoción de contaminante son las 1 y 3 las cuales contaban con una carga contaminante de 3%.
- El comportamiento en cuanto a eficiencia de remoción presenta los mayores porcentajes en cargas contaminantes de 3 y 5 %.
- La remoción de contaminante, expresada como TPH, no se ve influenciada por los diferentes pH(7 y 9), debido a que los porcentajes de remoción de hidrocarburos no presentaron variaciones mayores al 1%.
- El análisis económico mostró la comparación de costos en biorremediación, usando el abono 100% orgánico, contra 4 productos usados actualmente en el sector petrolero. Demostrando que el Abono es la mejor opción en cuanto a relación costo-beneficio.

| Agente bioremediador | Costo        | Tiempo medio de bioremediación |
|----------------------|--------------|--------------------------------|
| Septitrim grasas     | \$ 130.636.8 | 160 días                       |
| Biomerck Hc 85       | \$ 195.955.2 | 100 días                       |
| Biomerck Hc 906      | \$ 40.824    | 120 días                       |
| Abono Ceagrodex      | \$ 16,329.60 | 135 días                       |
| Bodyne 101           | \$ 85.730.4  | 190 días                       |

- El abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX es una herramienta útil para la industria de los hidrocarburos pues abre una ventana a nuevas posibilidades y desarrollos en investigación enfocados a la preservación, cuidado y mejoramiento del ambiente.

## 9. RECOMENDACIONES

- Es necesario seguir realizando investigaciones de este tipo, que manejen otro tipo de parámetros, controlados a cabalidad y así poder determinar cómo influye esto en los valores de TPH
- Buscar financiamiento privado o público para poder realizar una comparación con productos químicos y tener datos técnicos de la diferencia de TPH tanto en abono 100% orgánico como en biorremediadores del mercado.
- Evaluar las propiedades posteriores al tratamiento en los suelos finales, para saber qué tanto han cambiado sus características y si son totalmente funcionales; aclarar que este estudio no se ha podido realizar ni en este, ni en investigaciones previas debido a que no se cuenta con equipos especializados para estas condiciones del suelo, ya que presentan grasas, aceites y restos de abono.
- Luego de realizar este proyecto se evidencia la necesidad de generar más investigación en el área de la biorremediación, es claro que para la industria es fundamental el manejo, cuidado y preservación del ambiente y que mejor manera que generando y financiando la investigación en este ámbito.
- Buscar, generar o crear otras posibles opciones de agentes remediadores tanto en suelo como en agua, que al igual que el abono de CEAGRODEX cumplan con los estándares, sean amigables para el ambiente y los humanos, sin dejar de ser rentables.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, M. (1991). *Introduction to Soil Microbiology* (Second Edition ed.). New York, Ithaca, USA: Krieger Publishing.
- Alexander, M. (1999). *Biodegradation and bioremediation* (Second Edition ed.). San Diego, California, Usa: Academic Press.
- Alvarez Yaguara, J. S., & Garcia Jaramillo, L. C. (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*. Neiva, Huila, Colombia: Universidad Surcolombiana.
- Ansonera Miner, J. (1994). *Composición y propiedades físicas del suelo*. Sustrai.
- Atlas, R. M. (1981). *Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: An Environmental Perspective*. Louisville, Kentucky, USA: Microbiological Reviews.
- Atlas, R., & Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Madrid: Addison Wesley.
- Atlas, R., & Unterman, R. (1999). *Bioremediation*. In: Demain AL & Davies JE (eds). Washintong: ASM Press.
- ATSDR. (1998). *Reseña Toxicológica de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)*. Atlanta, USA: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Departamento de Salud y Servicios Humanos de losEE.UU., Servicio de Salud Pública.
- ATSDR. (1999). *Resumen de Salud Publica Hidrocarburos Totales de Petróleo*. Atlanta, USA.
- Bayona, J. M., Albaigés, J., Solanas, A. M., Pares, R., Garrigues, P., & Ewald, M. (1986). *Selective Aerobic Degradation of Methyl-Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Petroleum by Pure Microbial Cultures*. International Journal of Environmental Analytical Chemistry.
- Belloso, C. (1998). *XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Biodegradación de Suelos Contenidos en Terrarios*.

- Benavidez López, J., Quintero, G., Guevara Vizcaino, A. L., Jaimes Caceres, D. C., Gutierrez Riaño, S. M., & Miranda Garcia, J. (2006). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo*. (Vol. 4). Bogota, Colombia: Nova.
- Bermeo Cruz, C. D., & Perez Hueje, L. M. (2017). *Variación porcentual de los hidrocarburos totales de petróleo (tph) en suelos contaminados mediante el uso de abono 100% orgánico*. Neiva, Huila, Colombia: Universidad Surcolombiana.
- Bioinformatica.uab. (2016). *Bioinformatica*. Obtenido de <http://bioinformatica.uab.es>
- Bolsa de Comercio de Rosario. (s.f.). *Toma de muestra en análisis de suelo*. (C. d. laboratorios, Ed.) Cordoba, Argentina: Bolsa de Comercio de Rosario.
- Bossert, I. D., & Compeau, G. C. (1995). *Clean-up of petroleum hydrocarbon contamination soil*. In: Young LY, Cerniglia CE (eds) *Microbial transformation and degradation of toxic organic chemicals*. New York: WileyLiss, Inc.
- Boukir, A., Aries, E., Guiliano, M., Asia, L., Doumeng, P., & Mille, G. (2001). *Subfractionation, characterization and photooxidation of crude oil resins* (Vol. 43). Elsevier.
- Cárdenas, C., Vílchez, I., Bohórquez, M., Gómez, K., Angulo, N., & Gómez, A. (1996). *Influencia de la fertilización en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando lodos residuales estabilizados*. Maracaibo, Zulia, Venezuela: Universidad del Zulia.
- Castelblanco Casallas, I. F., & Niño Avendaño, J. A. (2011). *Manejo y tratamiento actual de residuos aceitosos en la industria petrolera colombiana*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Ceagrodex. (2017). Huila.
- Chan Quijano, J. G. (2015). *Evaluación de la degradación de hidrocarburos totales del petróleo por bioestimulación con abonos orgánicos asociados a especies arbóreas*. Villahermosa, Tabasco, Mexico.



- Chirinos, I., & Pereira, N. (1999). *Parcelas de lodo: Una alternativa de uso y manejo de lodos petroquímicos provenientes de sistemas de tratamiento de efluentes*. Rev. Fac. Agron.
- Consejo Argentino para la formación y el desarrollo de la Biotecnología. (2007). *Argenbio.org*. Obtenido de [www.argenbio.org](http://www.argenbio.org)
- Corona, L., & Iturbe, R. (2004). *Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos*. Ingeniería investigación y tecnología.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Mexico: Limusa S.A.
- Cursi, E., & Calleja, C. (2000). *Biorremediación de suelos contaminados con Hidrocarburos*. Mendoza, Argentina.
- Das, N., & Chandran, P. (2010). *Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview*. India: Biotechnology Research International.
- Dibble, J., & Bartha, R. (1979). *Effect of Environmental Parameters on the Biodegradation of Oil Sludge*. Applied and Environmental Microbiology.
- Durán, L., & Henríquez, C. (2007). *Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos*. Agronomía Costarricense.
- ECOPETROL. (2017). Colombia.
- EPA. (2002). United States Environmental Protection Agency. USA.
- EPA. (2006). *3540C Method Soxhlet Extraction SW-846 Test Methods*.
- Ercoli, E., Galvez, J., Di Paola, M., Cantero, J., Medaura, M., & Bauza, J. (2001). *Análisis y evaluación de parámetros críticos en biodegradación de hidrocarburos en suelo*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Eweis, J., Ergas, S., Chang, D., & E., S. (1999). *Principios de Biorrecuperación*. España: Mac Graw Hill.
- Fonseca, A., & Vargas, F. (2006). *Evaluación de consorcios microbianos con capacidad degradadora de residuos de hidrocarburos y su aplicación en biorremediación de suelos contaminados con aceites lubricantes usados*. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander.

- Food And Agriculture Organization of the United Nations;. (2001). *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/006/W1309S/w1309s04.htm>
- Gafonova, O., & Yarranton, H. (2001). *The Stabilization of Water-in-Hydrocarbon Emulsions by Asphaltenes and Resins*. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Glazer, A., & Nikaido, H. (1995). *Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology*. New York: Freeman and Company.
- Holliger, C., & Zehnder, A. (1996). *Anaerobic biodegradation of hydrocarbons*. *Current Opinion in Biotechnol.*
- Howe-Grant, M. (1996). *Encyclopedia of chemical technology*. New York: Wiley Interscience Publication.
- Huanachea-Bordon, A. (2007). *Biorremediación de la contaminación*.
- Ibarra Mojica, D. M. (2008). *Evaluación del potencial de biodegradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados procedentes de Petrosantander (Colombia) Inc*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Infante, C. (2001). *Comunicación Personal*.
- Janssen, D., Oppentocht, J., & Poelarends, G. (2001). *Microbial dehalogenation*. Groninga, Holanda.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia.
- Jaramillo, J. (1989). *Estudio general de suelos, erosión y uso potencial agropecuario del área de influencia del proyecto hidroeléctrico Riachón*. Amalfi, Antioquia, Colombia: EPM.
- Kostas, J. (1993). *Course Practical Asphaltenes Solutions & Management*.
- Lopez, A. (1994). *El biocompostaje de los residuos agroindustriales y el mejoramiento de la agricultura*. Biocenosis.
- Lugo, G., & Mesa, Y. (2001). *Biorremediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos utilizando Lodos Residuales Domésticos Tratados*. Venezuela.

- Maroto Arroyo, M., & Rogel Quesada, J. M. (s.f.). *APLICACIÓN DE SISTEMAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS*. España: Geocisa.
- Martienssen, M., & Schirmer, M. (2007). *Use of surfactants to improve the biological degradation of petroleum hydrocarbons in a field site study*. Alemania: Helmholtz Centre for Environmental Research.
- Martín, C., González, A., & Blanco, M. (2004). Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. *Revista Iberoamericana de Microbiología*, 103-120.
- Menezes, F., Oliveira, F., Okeke, B., & Frankenberger, W. (2003). *Bioremediation of soil contaminated by diesel*. Brazilian Journal of Microbiology.
- Messarch, M. B., & Messarch, L. (1997). *Modification of heterothropic plate counts for assessing the bioremediation potencial of petroleum – contaminated soils*. Environ. Technol.
- Metcalf., & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Bogota, Colombia.
- Mohn, W. W., & Stewart, G. R. (2000). *Limiting factors for hydrocarbon biodegradation at low temperature in Arctic soils*. Vancouver, Canada: Department of Microbiology and Immunology.
- Morelli, I. S. (1999). *Caracterización de la toxicidad de residuos con hidrocarburos. Importancia de la aplicación de bioensayos en procesos de biorremediación en suelo*. UNLP.
- Narváez, M., & Martínez, M. (2008). *Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos, aisladas a partir de sedimentos del Caribe colombiano*. Bol Invest Mar Cost Colombia.
- Nicolova, M., Spasova, I., Georgiev, P., & Groudev, S. (2014). *Microbial removal of toxic metals from a heavily polluted soil*. Bulgaria: University of Mining and Geology.

- Ñustez Cuartas, D. C. (2012). *Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Orosco Verdezoto, V. P., & Soria Guano, M. M. (2008). *Biorremediación de vegetación contaminada con petróleo por derrames en el campo guarumo*. Riobamba, Ecuador: Escuela superior politecnica de Chimborazo.
- Pineda Flores, G., & Mesta, H. A. (2001). *Petroleum asphaltenes: generated problematic and possible biodegradation mechanisms* (Vol. 43). Revista Latinoamericana de Microbiología.
- Pons-Jiménez, M., Guerrero-Peña, A., Zavala-Cruz, J., & Alarcón, A. (2011). *Extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en suelos con características físicas y químicas diferentes*. Mexico: Universidad y Ciencia.
- Prince, R. (2005). *Petroleum Microbiology*. Washintong DC: American Society of Microbiology press.
- Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., Palumbo, S., & Saviozzi, A. (2005). *Soil Biological Activities in Monitoring the Bioremediation of Diesel Oil-Contaminated Soil*. Pisa, Italia: Departamento de química y Biotecnología agraria.
- Rincon Lizcano, M. C. (2004). *Estudio de la biorremediación como una alternativa en la mitigación de la contaminación ambiental*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Rioja Chumazero, R., & Florero Maldonado, E. (2014). *Landfarming-Biorremediación*. Bolivia.
- Riser-Roberts, E. (1998). *Remediation of petroleum contaminated soils*. Lewis Publishers.
- Rittmann, B., & McCarty, P. (2001). *Biotecnología del Medio Ambiente*. McGraw Hill.
- Rivera Cruz, M. d., Ferrera Cerrato, R., Sanchez Garcia, P., Volke Haller, V., Fernandez Linares, L., & Rodriguez Vazquez, R. (2004). *Decontamination*

*of soils polluted with crude petroleum using indigenous microorganisms and alemán grass* (Vol. 38). Tabasco, Mexico: Agrociencia.

- Rivera-Cruz, M. d., Trujillo-Narcía, A., Miranda de la Cruz, M. A., & Maldonado Chávez, E. (2005). *Evaluación toxicológica de suelos contaminados con petróleos nuevo e intemperizado mediante ensayos con leguminosas* (Vol. 30). Caracas, Venezuela: Interciencia.
- Rojas, N., Rodríguez, R., Enríquez, F., Martínez, J., & Poggi, H. (1999). *Transformer oil degradation by an indigenous microflora isolated from a contaminated soil*. Centro de de Investigación y de Estudios avanzados.
- Rossini, F. (1960). *Hydrocarbons in petroleum*. Journal of Chemical Education.
- Sanclemente Reyes, O. (2011). *Propiedades y contaminación del suelo*. (P. y. Escuela de Ciencias Agrícolas, Ed.) Universidad Nacional abierta y a distancia.
- Sauri Riancho, M. R., & Castillo Borges, E. R. (2002). *Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes* (Vol. 6). (U. A. Yucatán, Ed.) Mexico.
- Silva Arroyave, S., & Correa Restrepo, F. (2009). *Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica*. Medellín: Universidad de Medellín.
- Solanas, A. (2009). *La biodegradación de hidrocarburos y su aplicación en la biorremediación de suelos*. Barcelona: Universidad de Barcelona .
- Solano Marin, A. (2005). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del Zinc*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Sora Velazco, G. (2016). *Descontaminación de suelos mediante Landfarmin*. Peru: PUCP.
- Speight, J. (1991). *The chemistry and technology of petroleum*. New York.
- Sutherland, J. B. (1992). *Detoxification of polycyclic aromatic hydrocarbons by fungi*. J. Ind Microbiol.
- Torres Delgado, K., & Zuluaga Montoya, T. (2009). *Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos*. Medellín, Colombia: UNAL.

- Torres, D., & Zuluaga, M. (2009). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Trujillo Toro, M. A., & Ramirez Quirama, J. F. (2012). *Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia*. Medellín, Colombia: UNAD.
- USDA. (1951). *United States Department of Agriculture*. Washington: Soil Survey Staff.
- Van Deuren, J., Wang, Z., & Ledbetter, J. (1997). *Remediation technologies screening matrix and reference guide*. Technology Innovation Office, EPA.
- Vargas Castellanos, C. (2017). *Evaluación técnica ambiental de la utilización del aceite de higuera en la formulación de un lodo base aceite*. Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana.
- Vargas Gallego, P. A., Cuellar, R. R., & Dussan, J. (2004). *Biorremediación de Residuos del Petróleo*. Bogotá: Apuntes Científicos UniAndinos.
- Vasallo, J., & Herrera, D. (2002). *Seminario de Hidrocarburos*. Argentina: Universidad Nacional de Comahue.
- Vasquez, A., Hernandez, S., Rasmussen, C., & Chorover, J. (2010). *Characterization of dissolved organic matter during reactive transport: A column experiment with spectroscopic detection*. AGU Fall Meeting (Poster).
- Villaseñor Roa, L. (2011). *Biorremediación. Cuadros comparativos de las técnicas in situ y ex situ y las ventajas y desventajas de la biorremediación*. Irapuato, Mexico: Instituto Tecnológico de Irapuato.
- Viñas Canals, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Barcelona, España: Universidad de Barcelona.
- Volke Sepúlveda, T. L., & Velasco Trejo, J. A. (2003). *Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*. Mexico: Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.
- Widdel, F., & Rabus, R. (2001). *Anaerobic biodegradation of saturated and aromatic hydrocarbons*. Bremen, Alemania: Elsevier Science Ltd.
- Wise, D. L. (2000). *Bioremediation of contaminated soils*. New York: Marcel Dekker.

## ANEXO A

### **CLASIFICACIÓN TEXTURAL USANDO MÉTODO DE BOUYOUCOS.**

El método del hidrómetro de Bouyoucos es una de las pruebas más rápidas para analizar el tamaño de las partículas del suelo. La muestra es mezclada en un cilindro de vidrio 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 el Anexo B).**

### **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 el Anexo B).**

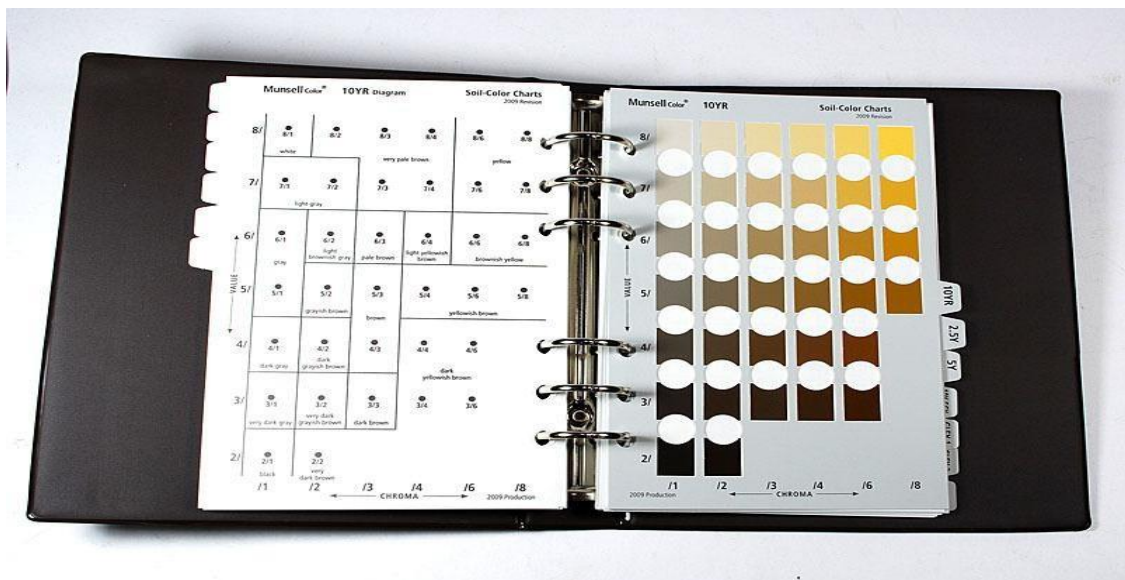
#### **Ilustración 15: Montaje para realizar tamizaje**



## COLOR

El método más utilizado para medir esta propiedad tanto 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 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.

### **Ilustración 16: Carta Munsell.**



Fuente: Autores

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). **(Ver procedimiento en el Anexo B).**

## 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, 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 el Anexo B).**

## **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 el Anexo B).**

**Tabla 21: Clasificación del suelo según su porosidad.**

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

## **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. **(Ver procedimiento en el Anexo B).**

## **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. El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas).

**Tabla 22: 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       |

(Ver procedimiento en el Anexo B).

### **MÉTODO DE EVALUACIÓN DE TPH**

Uno de los métodos que mayor renombre tiene en cuanto a determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en muestras de suelo contaminado es el método SOXHLET, ya que éste presenta valores confiables y está estandarizado como un procedimiento sumamente efectivo (Rivera-Cruz, Trujillo-Narcía, Miranda de la Cruz, & Maldonado Chávez, 2005); no obstante, requiere de una gran cantidad de tiempo para su desarrollo y el número de muestras que se logran evaluar son limitadas, debido a que solo se puede realizar una muestra por columna destiladora. A causa de 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, logrando así que sean más económicas y rápidas, con el fin de evaluar más muestras en menor tiempo y de manera eficaz. (Pons-Jiménez, Guerrero-Peña, Zavala-Cruz, & Alarcón, 2011)

El método empleado para la determinación de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en la muestra de suelo contaminado, se basó en el mismo principio que emplea el equipo de extracción SOXHLET, que consiste en emplear un solvente orgánico para extraer la totalidad de las grasas y aceites presentes en la muestra; 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; en 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 (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017).

## **DISEÑO Y MONTAJE EXPERIMENTAL**

Se planteó un diseño experimental a unos intervalos de tiempo determinados los cuales se consideraron óptimos para obtener unos resultados favorables en la evaluación de los niveles de TPH. Se encontró la necesidad de realizar un estudio a tiempo 0, ya que este valor arrojaría un estimado con el cual sería posible comparar los resultados a diferentes tiempos respecto al inicial; se eligieron los tiempos a 0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90 días, con el fin de poder realizar un análisis completo, es decir, encontrar un grupo de valores cercanos al inicial, otro intermedio y otro final durante los meses que dure el proceso; Respecto a la concentración de hidrocarburos usados para contaminar el suelo, se decidió 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; también 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.

## **OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CRUDO A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO**

La caracterización del crudo es la evaluación de la composición física y química de las materias componentes de este. Cada tipo de crudo tiene características moleculares y químicas únicas, que son importantes para los refinadores, comerciantes de petróleo y productores de todo el mundo. Los resultados de las caracterizaciones apoyan a ingenieros y refinadores en determinar si cierto tipo de crudo es compatible con una refinería en particular y también permite que los proveedores, prevean y tomen decisiones comerciales adecuadas.

Una evaluación de crudo puede ser una simple determinación de rendimiento o un análisis complejo de la calidad del crudo y de todas sus fracciones. Sin los ensayos del crudo, existe potencial para una pérdida económica significativa en las inversiones del crudo y/o perturbaciones en el proceso de refinación que tienen un impacto en el rendimiento, calidad, producción, y el medio ambiente.

## ANEXO B

### 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.

## **CLASIFICACIÓN TEXTURAL USANDO MÉTODO DE BOUYOUCOS**

### **Procedimiento:**

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

## **ANÁLISIS MECÁNICO DEL SUELO TAMIZADO**

### **Procedimiento previo:**

- Para realizar esta clasificación, se debe seguir el siguiente procedimiento previo:
  - El suelo se debe secar en horno.
  - Todos los grumos presentes se deben disolver 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 disueltos los grumos se toma la muestra y se hace pasar por los tamices, con ayuda de un vibrador con el fin de que exista un margen de error mínimo en el intercambio de las partículas entre los tamices buscando 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

| 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.  |
| Grisés              | 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 anótelo. 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.

## **DENSIDAD DEL SUELO**

- **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

- 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, se coloca una bolsa plástica y se sella, para llevarlo al laboratorio.
- Se coloca el cilindro con la muestra de suelo a secar en horno a 105 °C, durante 24 horas, cumplido el tiempo se retira el conjunto del horno, se deja enfriar y se pesa.
- Se retira el suelo del cilindro y se pesa. 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: Densidad aparente

Ps: Peso 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.

- Pesar el picnómetro completamente seco.
- Agregar aproximadamente de 2 a 5g de suelo seco, el cual debe haber sido tamizado por tamiz de 2mm.
- Pesar el picnómetro más el suelo seco y por diferencia de pesos con respecto al picnómetro vacío obtener 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 equivale a la diferencia entre la densidad real y la aparente. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$(\%) = 1 - \left( \frac{D_a}{D_r} \right) 100$$

Pt: Porosidad total

Da: Densidad aparente

Dr: Densidad real

### **HUMEDAD**

- 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.

$$\% = \left( \frac{W - W_0}{W_0} \right) 100$$

Wsh: Peso suelo húmedo

Wss: Peso suelo seco

### pH

- 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.

#### **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.

#### **Método gravimétrico modificado (extracción con solvente).**

- **Materiales y equipos**
- Embudo y/o botella de decantación para separación de fases
- Baño de María
- Cámara de extracción de gases y vapores orgánicos
- Bomba de vacío
- Balanza de precisión
- Estufa
- Termómetro
- Papel de filtrado
- Cápsulas de porcelana
- Probetas de diferentes volúmenes
- Vasos de precipitado de diferentes volúmenes
- Elemento para agitación.

➤ **Elementos y Reactivos:**

- Muestra de suelo contaminado
- Cloroformo
- Agua destilada

**Procedimiento**

- Se pesa una cápsula de porcelana vacía en la balanza de precisión.
- Se agrega suelo contaminado a la cápsula de porcelana y pesa en una balanza de precisión hasta obtener 1 gramo de muestra.
- Se agregan 100 mL de agua destilada a un vaso de precipitado, se calienta a 40°C aproximadamente.
- Se hidrata el gramo de suelo en los 100mL de agua destilada, 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 (Aproximadamente 20 ml de cloroformo en total).
- Se vierte la mezcla en el embudo de la bomba de vacío para lograr separar por completo la fase líquida (aceite-agua-cloroformo).
- Se retiran los papeles filtro del embudo que contienen los restos sólidos de la muestra.
- 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.