Neiva, 10 DE OCTUBRE DEL 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

NESTOR FABIAN TOVAR ARTUNDUAGA, con C.C. No. 1075 265 133,

MARIA PAULA CATAÑO POLANCO, con C.C. No. 1081157991,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado, titulado, TRATAMIENTO DE BORRAS POR UN AGENTE 100% ORGANICO POR EL METODO LANDFARMING, presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de INGENIEROS DE INGENIEROS 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:

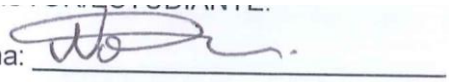
- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con 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.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: NÉSTOR FABIÁN TOVAR ARTUNDUAGA

Firma: 

EL AUTOR/ESTUDIANTE: MARÍA PAULA CATAÑO POLANCO

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Tratamiento De Borras Por Un Agente 100% Orgánico Por El Método Landfarming.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Tovar Artunduaga	Néstor Fabián
Cataño Polanco	María Paula

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
Morales Mondragón	Haydee
Botero Rojas	Luz Marina

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingenieros De Petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Petróleos

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 101

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

Diagramas_X__ 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: NO

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN *(En caso de ser LAUREADAS o Meritoria)*:

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

	Español	Inglés		Español	Inglés
1.	Biorremediacion	Biorremediation	6.	Disposicion Finales De Borras	Finals Disposal Of Sludges
2.	Landfarming	Landfarming			
3.	Borras	Sludges			
4.	Fondos De Tanques	Tank Funds			
5.	Aceites Oleosos	Oily Oils			

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este proyecto experimental realizado a nivel de laboratorio, pretende demostrar que las borras o fondos de tanques pueden degradarse hasta parámetros legales, a través de una técnica de biorremediacion con un agente 100% orgánico producto del compostaje de material ruminal y vegetal (abono Ceagrodex) y la técnica Landfarming. Para desarrollarlo se llevó a cabo el montaje de 16 eras con 445.5 g de suelo cada una, con relaciones de Abono- Suelo de 0.5:1 (222.75 g), 1:1 (445.5 g), 1.5:1 (668.25), 2:1 (891 g), y contaminación con borras de 61.2 g, 121.5 g, 243 g, 364.5 g, respectivamente.

El experimento se llevó a cabo bajo parámetros de pH entre 6-8, temperatura ambiente y

visiblemente húmedo. De esta manera se obtuvieron resultados prometedores, tanto así que se logró la disminución 3% TPH y 1% TPH para las16 eras a excepción de la era 4 la cual no quedo por debajo del 1% TPH en un tiempo de 98 días ya que su carga contaminante inicial de borra era demasiado alta (13%). Las relaciones de Abono-Suelo que obtuvieron resultados en un menor tiempo posible fueron las 1.5:1 y 2:1.

Continuamente la mejor era con eficiencia y rata de biorremediacion fue la 11 con una relación Abono- Suelo 1.5-1, valores iniciales de 243 g de Borras, 89 g de Hcs equivalentes al 6.6 %TPH. Esta alcanzó los niveles de 3% y 1%de TPH, un porcentaje de 66.43% y 87.8% en 22 y 35 días respectivamente, debido a la cinética de degradación de contaminante orgánicos por parte de los microorganismo presentes en el abono Ceagrodex como los Mesófilos y Termófilos. Estos impulsados en su desarrollo y crecimiento gracias a las altas cantidades de nitrógeno (N) y fosforo (P) presentes en las era 11 en valores de 17.1072 g y 17.0983 g respectivamente. Logrando de esta manera relaciones C/N y C/P, relaciones esenciales para el desarrollo y crecimiento microbiano.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This experimental project performed at the laboratory level, aims to show that the slops or bottoms of tanks can be degraded to legal parameters, through a bioremediation technique with a 100% organic agent from the composting of ruminal and plant material (Ceagrodex fertilizer) and the Landfarming technique. To develop it, the assembly of 16 eras was implemented with 445.5 g of soil each one, with Fertilizer-Soil ratios of 0.5: 1 (222.75 g), 1: 1 (445.5 g), 1.5: 1 (668.25), 2: 1 (891 g), and contamination with sludges of 61.2 g, 121.5 g, 243 g, 364.5 g, respectively.

The experiment was performed under pH parameters between 6-8, room temperature and visibly humid. In this way, promising results were obtained, so much so that the decrease of 3% TPH and 1% TPH was achieved for the 16 eras except for the era number 4 which was not below 1% TPH in a time of 98 days as its initial pollutant load of sludges was too high (13%). The Fertilizer-Soil ratios that obtained results in the shortest possible time were 1.5: 1 and 2: 1.

Continuously the best era with efficiency and bioremediation rate was number 11 with a Fertilizer-Soil ratio of 1.5-1, initial values of 243 g of sludges, 89 g of Hcs equivalent to 6.6% TPH. The levels of 3% and 1% of TPH, a percentage of 66.43% and 87.8% in 22 and 35 days respectively, due to the kinetics of degradation of organic pollutants by the microorganisms present in the Ceagrodex fertilizer such as Mesophiles and Thermophiles. These impulses in their development and growth thanks to the high quantities of nitrogen (N) and phosphorus (P) present in the 11th era in values of 17,1072 g and 17,0983 g respectively. Achieving in this way C / N and C / P relationships, essential relationships for development and microbial growth.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Constanza Vargas Castellanos

Firma: Constanza Vargas Castellanos.

Nombre Jurado: Haydee Morales Mondragón

Firma: Haydee Morales.

Nombre Jurado: Luz Marina Botero Rojas

Firma:

TRATAMIENTO DE BORRAS POR UN AGENTE 100% ORGANICO POR EL METODO LANDFARMING



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA DE PETROLEOS

NEIVA, HUILA

2019

TRATAMIENTO DE BORRAS POR UN AGENTE 100% ORGANICO POR EL METODO LANDFARMING

NESTOR FABIAN TOVAR ARTUNDUAGA

MARIA PAULA CATAÑO POLANCO

Proyecto de grado como requisito para optar el título de Ingenieros de Petróleos

Director

Ms. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS

Ingeniera de Petróleos

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA DE PETROLEOS

NEIVA, HUILA

2019

TRATAMIENTO DE BORRAS POR UN AGENTE 100% ORGANICO POR EL METODO LANFARMING

AREA DE INVESTIGACION: Biorremediacion

SEMILLERO DE INVESTIGACION: Operation, Process, Hydrocarbons, Energy and Environment-OPHEEN

GRUPO DE INVESTIGACION: Geociences, Infraestructure, Productivity, Environment-GIPE

PRESENTADO AL COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO DEL PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS

Director _____

Msc. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS

Jurado

_____

Esp. HAYDEE MORALES MONDRAGÓN

Jurado

_____

Msc. LUZ MARINA BOTERO ROJAS

Neiva, julio 2019

DEDICATORIA

En primer lugar quiero agradecer a Dios por su presencia en mi vida y la vida de mi familia, porque no me dejó caer en ningún momento y sus promesas siempre se cumplieron en mi vida, por darme la maravillosa oportunidad de haber realizado esta carrera, por poner en mi vida las personas indicadas que me ayudaron en este proceso de aprendizaje y por todas las cosas que aprendí durante todo este tiempo. Quiero agradecerles también a mis padres José Fabián Tovar Murillo y María Patricia Artunduaga Álvarez por haberme aguantado y colaborado durante todo este tiempo, porque me estuvieron apoyando incondicionalmente, a mi hermana Leidy Tatiana Artunduaga Álvarez y su esposo Ricardo Enríquez por su apoyo incondicional, por su voz de aliento, por sus regaños constantes que no me dejaron caer en este largo camino, a la señora Rosmira Sanabria por su gran ayuda, su gran apoyo y su gran comprensión para conmigo, sus buenos deseos estuvieron siempre en mi corazón, a mi compañera María Paula Cataño Polanco la cual fue siempre de mi gran ayuda y comprensión para la realización de este trabajo y por últimos a mis tíos y familiares que siempre creyeron en mí.

Néstor Fabián Tovar Artunduaga

Agradezco a Dios por todas las oportunidades que me dio en la vida, por estar ahí cuando más lo necesitaba, por guiarme durante toda la carrera. Agradezco a mi familia por apoyarme en todo el trascurso de mi vida, porque creyeron en mí y siempre me dieron su apoyo. Agradezco a mis amigos por estar ahí cuando más los necesitaba en los buenos y malos momentos.

María Paula Cataño Polanco

ADRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestra profesora Msc. Constanza Vargas Castellanos por su paciencia con nosotros, sus enseñanzas, por ser esa profesora incondicional, amable, alegre y buena amiga. También agradecemos a las profesoras y jurados Haydee Morales por su gran apoyo en el desarrollo de este proyecto, por su amabilidad y carisma para con nosotros y a la profesora Luz Marina Botero por su amabilidad y comprensión.

RESUMEN

Este proyecto experimental realizado a nivel de laboratorio, pretende demostrar que las borras o fondos de tanques pueden degradarse hasta parámetros legales, a través de una técnica de biorremediacion con un agente 100% orgánico producto del compostaje de material ruminal y vegetal (abono Ceagrodex) y la técnica Landfarming. Para desarrollarlo se llevó a cabo el montaje de 16 eras con 445.5 g de suelo cada una, con relaciones de Abono- Suelo de 0.5:1 (222.75 g), 1:1 (445.5 g), 1.5:1 (668.25), 2:1 (891 g), y contaminación con borras de 61.2 g, 121.5 g, 243 g, 364.5 g, respectivamente.

El experimento se llevó a cabo bajo parámetros de pH entre 6-8, temperatura ambiente y visiblemente húmedo. De esta manera se obtuvieron resultados prometedores, tanto así que se logró la disminución 3% TPH y 1% TPH para las16 eras a excepción de la era 4 la cual no quedo por debajo del 1% TPH en un tiempo de 98 días ya que su carga contaminante inicial de borra era demasiado alta (13%). Las relaciones de Abono-Suelo que obtuvieron resultados en un menor tiempo posible fueron las 1.5:1 y 2:1.

Continuamente la mejor era con eficiencia y rata de biorremediacion fue la 11 con una relación Abono- Suelo 1.5-1, valores iniciales de 243 g de Borras, 89 g de Hcs equivalentes al 6.6 %TPH. Esta alcanzó los niveles de 3% y 1%de TPH, un porcentaje de 66.43% y 87.8% en 22 y 35 días respectivamente, debido a la cinética de degradación de contaminante orgánicos por parte de los microorganismo presentes en el abono Ceagrodex como los Mesófilos y Termófilos. Estos impulsados en su desarrollo y crecimiento gracias a las altas cantidades de nitrógeno (N) y fosforo (P) presentes en las era 11 en valores de 17.1072 g y 17.0983 g respectivamente. Logrando de esta manera relaciones C/N y C/P, relaciones esenciales para el desarrollo y crecimiento microbiano.

Palabras claves: Biorremediacion, Landfarming, suelos contaminados, hidrocarburos totales de petróleos (TPH), Borras, Fondos de Tanques, Aceites Oleosos, disposición finales de borras.

ABSTRACT

This experimental project performed at the laboratory level, aims to show that the slops or bottoms of tanks can be degraded to legal parameters, through a bioremediation technique with a 100% organic agent from the composting of ruminal and plant material (Ceagrodex fertilizer) and the Landfarming technique. To develop it, the assembly of 16 eras was implemented with 445.5 g of soil each one, with Fertilizer-Soil ratios of 0.5: 1 (222.75 g), 1: 1 (445.5 g), 1.5: 1 (668.25), 2: 1 (891 g), and contamination with sludges of 61.2 g, 121.5 g, 243 g, 364.5 g, respectively.

The experiment was performed under pH parameters between 6-8, room temperature and visibly humid. In this way, promising results were obtained, so much so that the decrease of 3% TPH and 1% TPH was achieved for the 16 eras except for the era number 4 which was not below 1% TPH in a time of 98 days as its initial pollutant load of sludges was too high (13%). The Fertilizer-Soil ratios that obtained results in the shortest possible time were 1.5: 1 and 2: 1.

Continuously the best era with efficiency and bioremediation rate was number 11 with a Fertilizer-Soil ratio of 1.5-1, initial values of 243 g of sludges, 89 g of Hcs equivalent to 6.6% TPH. The levels of 3% and 1% of TPH, a percentage of 66.43% and 87.8% in 22 and 35 days respectively, due to the kinetics of degradation of organic pollutants by the microorganisms present in the Ceagrodex fertilizer such as Mesophiles and Thermophiles. These impulses in their development and growth thanks to the high quantities of nitrogen (N) and phosphorus (P) present in the 11th era in values of 17,1072 g and 17,0983 g respectively. Achieving in this way C / N and C / P relationships, essential relationships for development and microbial growth.

Key words: Bioremediation; Landfarming; Contaminated soils; total petroleum hydrocarbon (TPH); Sludges; Tank Funds; Oily Oils; final disposal of sludges.

TABLA DE CONTENIDO

pág.

SINTESIS 1
1. INTRODUCCIÓN 2
1.1 JUSTIFICACIÓN 3
1.3 GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN 4
1.3.1 Descripción y planteamiento del Problema 4
1.3.2. Hipótesis 4
1.4. OBJETIVOS 5
1.4.1. Objetivo General 5
1.4.2. Objetivos Específicos 5
2. MARCO TEÓRICO 6
2.1. COMPOSICIÓN DEL CRUDO DE PETRÓLEO 6
2.2 EL SUELO 7
2.2.1. Composición del suelo 7
2.2.2. Perfil del suelo 8
2.2.3. Textura del suelo 9
2.3. Hidrocarburos 11
2.3.1. Química de los hidrocarburos 11
2.3.2 hidrocarburos totales de petróleo (TPH) 14
2.4. BORRAS DE HIDROCARBUROS 15
2.4.1. Definición de borras de hidrocarburos 15
2.4.2. Composición de las borras de hidrocarburos 15
2.4.3. Tipos de Borras 15
2.4.4. Tratamiento de las Borras 16
2.4.5. Generación de borras de hidrocarburos 16
2.5. BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS. 17
2.5.1. Requerimientos básicos para que exista biodegradación en el suelo 18
3.1. MARCO LEGAL 20
3.1. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL 20
3.2. LEGISLACIÓN NACIONAL 21
4. MARCO CONTEXTUAL 23

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 23
4.1.1. Antecedentes 24
4.1.2. Características de las muestras y área de almacenamientos de las borras. 25
4.2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE BIORREMEDIACION 26
4.2.1. Actividades in situ 26
4.2.2. Actividades ex situ 32
5. MARCO EXPERIMENTAL 41
5.1. VARIABLES UTILIZADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN 41
5.1.1 Datos utilizados en el modelo 41
6. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. 46
6.1 ANALISIS DE LAS MUESTRAS 46
6.1.2CARACTERIZACIÓN DE SUELO REMEDIADO 56
6.2. ANÁLISIS RATA DE BIODEGRADACION. 57
6.2.1. ANALISIS ERA 11 57
6.2.2. Nutrientes 63
6.2.3. Microbiología 66
7. CONCLUSIONES 68
8. RECOMENDACIONES 69
9. BIBLIOGRAFÍA 70
ANEXO A 73
ANEXO B 78

ÍNDICE DE TABLAS

pág.

Tabla 1: Clasificación de las partículas del suelo. 10
Tabla 2.Clasificación de los hidrocarburos 12
Tabla 3. Datos Obtenidos de la caracterización de las Borras 26
Tabla 4.Muestra de suelo previo a la contaminación por Borras 27
Tabla 5. Datos a recolectar durante la disminución de %TPH del proyecto. 28
Tabla 6.Distribución y composición de las eras. 29
Tabla 7.Relación Suelo – Abono. 30
Tabla 8. Valores de carga contaminante, pH y Humedad de cada Era. 30
Tabla 9.Resultados prueba 1, tiempo cero (0) días 41
Tabla 10. Resultados prueba 2, tiempo 22 días 42
Tabla 11.Resultados prueba 3, tiempo 35 días 43
Tabla 12. Resultados prueba 4, tiempo 50 días 43
Tabla 13.Resultados prueba 5, tiempo 98 días 44
Tabla 14.Aporte nutricional por parte del abono al suelo en cantidades iguales. 65
Tabla 15.Aporte nutricional del abono de acuerdo a la relación abono-suelo manejando el diseño experimental. 66
Tabla 16.Microorganismo Presentes en abono Ceagrodex. 66
Tabla 17.Clasificación porosidades del suelo 75
Tabla 18.Valores pH de los suelos. 76
Tabla 19.Colores la arcilla. 81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

pág.

Ilustración 1. Horizontes del suelo..... 9
Ilustración 2. Diagrama triangular para determinar la textura del suelo..... 10
Ilustración 3. Estructuras químicas de diferentes componentes del crudo..... 14
Ilustración 4. Principios básicos de biorremediación..... 17
Ilustración 5. Finca la Bonita.. 23
Ilustración 6. Imagen Aérea de la Finca la Bonita.. 24
Ilustración 7. Caneca de pintura con las Borras del proyecto.. 26
Ilustración 8. Toma de la muestra de suelo en la finca la bonita.. 27
Ilustración 9. Montaje final de las eras contaminadas con borras 1..... 31
Ilustración 10. Monatje final de las eras contaminadas con borras 2..... 31
Ilustración 11. Montaje final de las eras contaminadas 3.. 32
Ilustración 12. Muestra de borras y Erlenmeyer, para la respectivo peso. 33
Ilustración 13. Agua destilada en baño maría a 80 Celsius..... 34
Ilustración 14. Cloroformo utilizado durante el proyecto..... 34
Ilustración 15. Mezcla de agua destilada y muestras con los 20 ml de cloroformo..... 35
Ilustración 16. Decantación de la muestra de las fases más livianas. 36
Ilustración 17. Filtración de la parte más liviana de la mezcla con muselina. 36
Ilustración 18. Resultado de la filtración con muselina. 37
Ilustración 19. Resultado de las muestras obtenidas despues de la filtración..... 38
Ilustración 20. Baño maría para las muestras filtradas. 38
Ilustración 21. Muestras evaporándose con el baño maría 80 Celsius..... 39
Ilustración 22. Eras después de 98 días de la biorremediación..... 57
Ilustración 23. Composición elemental típica de células bacterianas en base seca. 64
Ilustración 24. Organismos degradadores de Petróleos.. 64
Ilustración 25. Composición elemental de biomasa para diferentes especies bacterianas..... 65
Ilustración 27. Tamizado del suelo 73
Ilustración 28.Gama colores del suelo. 74

ÍNDICE DE GRÁFICOS

pág.

Grafico 1. %TPH vs eras para el día cero (0) 46
Grafico 2. %TPH vs eras para el día 22. 47
Grafico 3. %TPH vs eras día 35..... 48
Grafico 4. %TPH vs eras día 50..... 49
Grafico 5. %TPH vs eras día 98..... 50
Grafico 6. %TPH vs tiempo. 55
Grafico 7. Rata de biorremediacion era 11. 58
Grafico 8. Eficiencia en cada era, día 22. 58
Grafico 9. Eficiencia en cada era, día 35. 59
Grafico 10. Rata de biorremediacion era 3. 60
Grafico 11. Rata de biorremediacion era 4.. 60
Grafico 12. Rata de biorremediacion era 7.. 61
Grafico 13. Rata de biorremediacion era 8.. 61
Grafico 14. Rata de biorremediacion era 12.. 62
Grafico 15. Rata de biorremediacion era 14.. 62
Grafico 16. Rata de biorremediacion era 15.. 63
Grafico 17. Rata de biorremediacion era 16.. 63

SINTESIS

La biorremediación de suelos contaminados es una técnica de tratamiento que tiene como objetivo utilizar el potencial de la microbiota autóctona o exógena del suelo, para degradar los compuestos orgánicos que lo contaminan. Para efectos del presente proyecto de investigación se emplearon borras de hidrocarburos suministradas por ECOPETROL S.A.

Inicialmente se realizó la caracterización preliminar de las borras, con el fin de establecer el contenido de sedimentos, BSW, gravedad API, gravedad específica, viscosidad y salinidad de las mismas. Los experimentos se realizaron aplicando las normas ASTM: D1298-99 para la medición de grados API, D4007-08 para la medición del contenido de agua y sedimentos y el método D1587-04 para la determinación de la viscosidad Saybolt y Furol.

Para llevar a cabo los experimentos realizados se desarrollaron tres Etapas. (1) Selección de las muestras representativas de suelo limpio. (2) Caracterización físico – química del suelo limpio. (3) Realización de la biorremediación del suelo contaminado con borra en diferentes proporciones de agente biodegradante CEAGRODEX. Se dispuso de 16 eras (áreas de experimentación) mezclando suelo-Abono-Borras en diferentes proporciones en recipientes de plástico con dimensiones de 20 cm ancho, 30 cm de largo y 5 cm de alto. Durante el desarrollo de la experimentación las muestras estuvieron expuestas a temperatura de ambiente y humedad observable sin agua libre.

El caso práctico desarrollado consideró la aplicación combinada de Landfarming y biodegradación como proceso de remediación, llegando a obtener cargas de 3% y 1% de %TPH permitido en suelos contaminados por crudos según la norma internacional (Louisiana 29B).

Los resultados obtenidos sugieren que la metodología utilizada representa una alternativa ambiental y económicamente viable en la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos, la cual se ve favorecida cuando es aplicada a suelos arenosos y cuando el hidrocarburo es de cadena corta.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas actuales en la industria petrolera, es la acumulación y disposición final de las borras (también conocidas como fondos de tanques o lodos aceitosos) provenientes de los tanques de almacenamiento de crudo, zonas de baja velocidad y zonas muertas de tubería, las cuales se caracterizan por tener altos contenidos de hidrocarburos, agua, sólidos, se catalogan como desechos potencialmente tóxicos, mutagénicos y carcinogénicos (a pesar de no tener estos últimos dos efectos) perjudiciales para el medio ambiente y no pueden ser arrojados a este sin antes ser tratados (Herrera Pinedo, 2014).

Para tratar este problema que acarrea a la industria del petróleo, el mantenimiento regular de tanques usados en almacenamiento y bombeo de crudo requiere de la extracción, recuperación, reutilización adecuada y posterior tratamiento de cantidades importantes de borras generadas anualmente por la industria. Por citar un ejemplo, según el estimativo de la Superintendencia de Operaciones de Castilla-Chichimene (SCC) de Ecopetrol S.A, la producción de residuos aceitosos desde el 2011 hasta el 2015 fue de 14.400 barriles, equivalentes a 575 toneladas residuos/año (Torres Cervera, 2014).

Para disponer de las borras de crudo y que cumplan con los estándares propuestos a nivel nacional, se emplean métodos que dependen tanto de la parte económica como del tiempo en cuestión al que se quiere llevar el tratamiento. Es así como se han desarrollado tecnologías de remediación entre las cuales se encuentra el Landfarming, técnica en la cual la aceleración de procesos se logra con el aumento de microorganismos y aportes de nutrientes a suelos contaminados con hidrocarburos, en donde la acción microbiana acelera la descomposición de estos (Sanchez Ortiz & Velasquez Olarte, 2018).

El interés de este proyecto ha sido investigar el tratamiento de una borra por un abono 100% orgánico llamado CEAGRODEX usando la técnica landfarming, para determinar la eficiencia del abono como un agente biorremediador, de bajo costo económico y entrópico, teniendo en cuenta parámetros que influyen en el proceso de degradación y crecimiento bacteriano como el pH, la Humedad, concentraciones de Borra-Abono-Suelo.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los residuos de la industria petrolera son mezclas muy complejas y de difícil tratamiento. Es así como algunos de los compuestos presentes en las borras son transferidos al aire en forma de compuestos orgánicos volátiles debido a las condiciones de alta temperatura usualmente existente en las zonas de extracción y a la liberación no controlada de compuestos tóxicos al ambiente (Torres Cervera, 2014). También la mala disposición de la borras, sumado a la gran cantidad de producción y extracción de solidos tipos borras en los campos Colombianos como una consecuencia de una mayor producción de crudo, conlleva a la producción de daños colaterales en el ecosistema, tanto en cuerpos de agua superficiales y subterráneas como en el suelo, cuya remediación incrementaría significativamente los costos ambientales y económicos.

Es por eso que para el tratamiento, manejo y disposición final de las borras o lodos aceitosos, se buscan tecnologías que se acomoden a la realidad del ambiente como la biorremediación por el método landfarming, el cual es motivo de estudio y desarrollo en este proyecto, en donde la borra es mezclada en proporciones diferentes de suelo y abono, controlando parámetros de pH y humedad y de esta manera sirva como base para el beneficio de la industria o en trabajos posteriores.

1.3 GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Descripción y planteamiento del Problema

. La generación de borras en la industria petrolera origina impactos ambientales, económicos, costos de tratamientos y afectación en la salud humana. Es de vital importancia encontrar maneras de disponer este tipo de residuos y de materiales orgánicos como abonos que sean amigables con el medio ambiente, que reduzcan tiempo y costos de operación.

¿El abono orgánico Ceagrodex tendrá la suficiente capacidad de biorremediar suelos contaminados con borras, eliminando los hidrocarburos totales de petróleo?

1.3.2. Hipótesis

El abono CEAGRODEX funciona como agente biorremediador, tratando suelos contaminados por borras o derrames de hidrocarburos, incentivando el crecimiento bacteriano con las condiciones de pH y humedad óptimas para que el crudo presente en la borra sea biodegradado con porcentajes por debajo de 3% y 1% TPH, en un periodo de tiempo mínimo de veinticinco a noventa días con relaciones abundantes de Abono (relación 1:2 o superio).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la efectividad del proceso de biorremediacion de borras al aplicar abono Ceagrodex, controlando parámetros de pH y humedad por el método Landfarming, demostrando que el suelo biorremediado queda con los porcentajes mínimos de (TPH) exigidos por la legislación Colombiana para su disposición y posterior uso.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar caracterización de la borra a tratar estableciendo gravedad API, contenido de BSW, viscosidad y cantidad de sales presentes establecidas en las normas ASTM para extracción de grasas.

- Realizar montaje experimental en el laboratorio con diez y seis eras, empleando el método Landfarming, mezclando Borra-Suelo-Agente Orgánico de biorremediacion en proporciones diferentes, controlando pH y humedad.

- Evaluar los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) por el método de extracción por solvente en diferentes tiempos para determinar la efectividad del abono Ceagrodex en el proceso de biorremediacion.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. COMPOSICIÓN DEL PETRÓLEO

Químicamente, el petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos con estructura molecular compleja dada la capacidad del átomo de carbono que forma cuatro enlaces con otros átomos de carbono, pudiendo formarse estructuras moleculares en forma de cadena o ciclos. Las cadenas se conocen como compuestos alifáticos, y consisten en sucesiones de átomos de carbono unidos entre sí por enlaces sencillos (alcanos), dobles (alquenos) o triples (alquinos) mientras que el resto de las valencias son ocupadas por hidrógenos. Además, se encuentran conformados por elementos minoritarios como el Oxígeno, Azufre, Nitrógeno y trazas de metales como el Níquel y el Vanadio (Pinedo, 2014).

Los hidrocarburos cíclicos pueden ser saturados o aromáticos. Los saturados son aquellos en donde varios carbonos se unen entre sí por medio de enlaces sencillos; los ciclos saturados se conocen como ciclo alcanos, ciclo parafinas o naftenos y son componentes minoritarios del crudo del petróleo.

Los aromáticos por su parte se encuentran unidos por enlaces dobles carbono a carbono; los compuestos aromáticos son derivados del Benceno, un anillo de seis carbonos unidos por tres enlaces sencillos y tres enlaces dobles alternados, los anillos pueden encontrarse fusionados entre sí o sustituidos por cadenas alifáticas. Estos al ser polares o no polares presentan la capacidad de no disolverse en el agua. Los hidrocarburos poli cíclicos aromáticos son las fracciones más pesadas del petróleo y lo comprenden del 10 al 25%.

Así mismos, se encuentran la fracción de resinas compuestas por agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfoxidos y amidas; y la fracción de asfáltenos compuestos por agregados de hidrocarburos poli cíclicos aromamaticos, ácidos naftenicos, sulfuros, ácidos grasos, metaloporfirinas y fenoles polihidratados, estas fracciones son los componentes de mayor recalcitracion del crudo de petróleo (Pinedo, 2014).

2.2 EL 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 (FAO, 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 (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 (FAO, 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 (FAO, 2001).

- Se multiplican los pequeños organismos (lombrices, insectos, hongos, bacterias) que transforman la vegetación y los animales que mueren (Alexander, 1999), 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 (FAO, 2001).

2.2.1. 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, 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.

- Organismos vivos. Ocupan menos del 1% del volumen.

- Materia orgánica. Oscilan entre el 3 y 6% del volumen.

2.2.2. 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, 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) (J., 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) (J., 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.

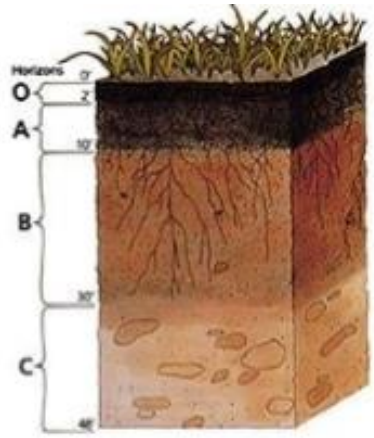


Ilustración 1. Horizontes del suelo. Fuente: (Dorronsoro, 2010).

2.2.3. 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.

Entre los múltiples criterio existentes para la clasificación textural del suelo se emplea el del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) basado en el triángulo textural (ilustración 2), donde se conoce que tipo de suelo se trata de acuerdo a la cantidad presente de arcilla, arena y limo.

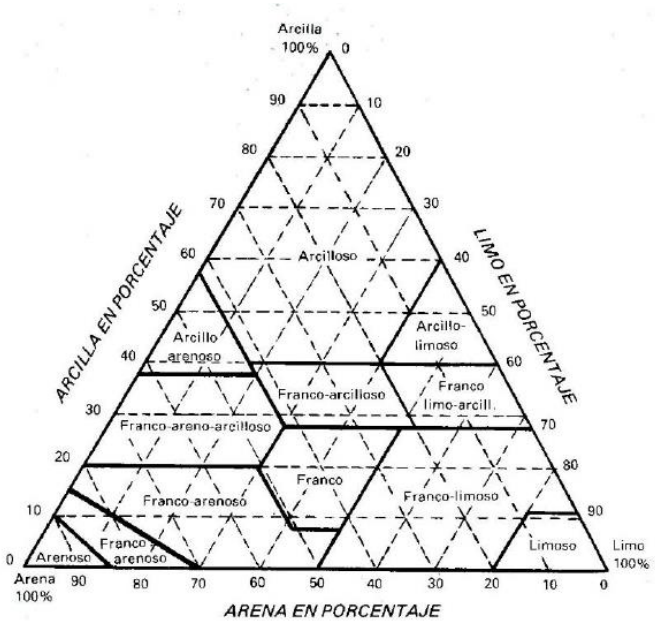


Ilustración 2. Diagrama triangular para determinar la textura del suelo. Fuente: (Crosara, 2012)

A continuación se expone cuáles 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 Diámetro (mm)	Sistema Internacional (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 (Crosara, 2012)

2.3. HIDROCARBUROS

Generalmente, el hidrocarburo se define por ser un líquido negro, viscoso y con una composición química sumamente compleja, pudiendo contener miles de compuestos, básicamente de la familia de los hidrocarburos los cuales son acumulados de forma natural debido a muy específicas condiciones geológicas. La composición elemental de un crudo está condicionada por la predominancia de los compuestos tipo hidrocarburos: 83-87% C, 10-14% H, 0.05-6%S, 0.05-1.5% O, 0.1-2% N y metales como el níquel y el vanadio.

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

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 (ilustración 3), en diferentes subgrupos (Kostas,1993) ver tabla 2.

- Saturados o parafinicos (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).

Tabla 2. *Clasificación de los hidrocarburos*

Fracción o Subdivisión	Composición
Saturados o parafinicos	n-alcanos, alcanos de cadena ramificada, y ciclo parafinas o ciclo alcanos, hopanos.
Aromáticos	Hidrocarburos monoaromaticos, diaromaticos, aromáticos policiclicos (PAH's)
Resinas	Agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfoxidos y amidas
Asfaltenos	Agregados de PAH, ácidos naftenicos, sulfuros, ácidos grasos, metaloporfirinas, fenolespolihidratados.

Fuente: (Canals, 2005)

Hidrocarburos alifáticos

Los hidrocarburos alifáticos están divididos en alcanos acíclicos (normales y ramificados) y cicloalcanos (naftenos) (Atlas, 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 (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% (DELGADO & 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 fuel (DELGADO & MONTOYA, 2009).

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) (Canals, 2005) (DELGADO & 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 (DELGADO & 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 (DELGADO & MONTOYA, 2009).

Resinas y Asfáltenos

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, Derwich, & Benziane, 2009). 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, hidrocarburos aromáticos policiclicos (HAP), sulfuros, ácidos nafténicos, ácidos grasos, metaloporfirinas y fenoles polihidratados (Gafonova & Yarranton, 2001).

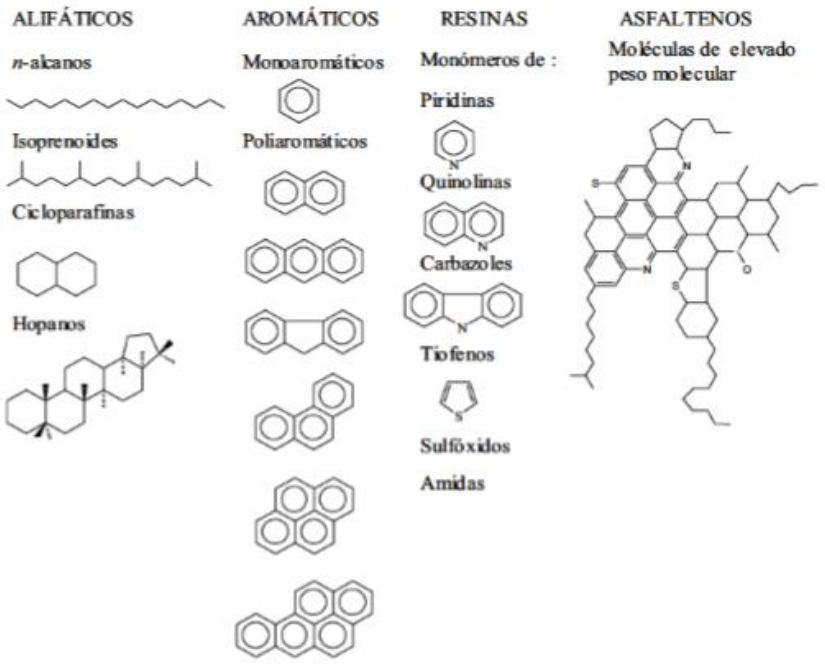


Ilustración 3. Estructuras químicas de diferentes componentes del crudo. Fuente: (Canals, 2005).

2.3.2 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 ((ATDSR), 1987).

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 ((ATDSR), 1987).

2.4. BORRAS DE HIDROCARBUROS

2.4.1. Definición de borras de hidrocarburos

En la industria del Petróleo se denominan borras a todos aquellos residuos altamente viscosos conformado por agua, solidos inorgánicos (arena, rocas, lodos de perforación), materia orgánica e hidrocarburos que se sedimentan y aglomeran después de largos periodos de tiempo en zonas del proceso de extracción y transporte con velocidades reducidas. La acumulación de borras causa una reducción de la capacidad instalada de almacenamiento así como un aumento de las pérdidas por fricción en tuberías, con el consiguiente aumento en el gasto energético de bombeo y una reducción del caudal operativo del mismo, formándose masas densas y viscosas, difíciles de bombear. (BORRAS(OTS), 2018).

2.4.2. Composición de las borras de hidrocarburos

Molecularmente, las borras de hidrocarburo están compuestas por hidrocarburos parafinicos (normal, iso y ramificado), hidrocarburos asfálticos, compuestos sulfurosos (Ácido Sulfhídrico, Mercaptanos y Aromáticos), gases disueltos (Oxigeno, Nitrógeno y Dióxido de Carbono) y sedimentos (arena, óxidos metálicos, cadenas parafinicas, núcleo asfalticos y coloides asfálticos), (Pinedo, 2014).

2.4.3. Tipos de Borras

La clasificación de las borras dependerá directamente del tipo de crudo almacenado en el tanque, a su vez el tipo de crudo dependerá de su composición. En general según la Sociedad General de Minería, Petróleo y Energía colombiana, establece la composición de un crudo como: 83 – 87% de Carbono, 11-14% de Hidrogeno, 0-5% Oxigeno, 0-6% Azufre, 0-0.5% de Nitrógeno y 0-0.1% de Compuestos Inorgánicos (Ocampo & Dominguez., 2015).

2.4.4. Tratamiento de las Borras

Las borras o lodos aceitosos se distinguen en tres fases a saber:

- Fase aceite
- Fase sólida
- Fase acúosa

Dentro de la eficiencia y grado de especialización, el tratamiento puede ser clasificado en tratamiento primario, secundario y terciario. Dentro de esta clasificación, los métodos aplicados pueden agruparse de la siguiente manera:

- Método Físico
- Método Químico
- Método Térmico
- Métodos Biológicos

De la aplicación de uno o de la combinación de estos métodos depende el éxito del tratamiento de las borras (Ocampo & Dominguez., 2015).

2.4.5. Generación de borras de hidrocarburos

Las borras de hidrocarburos se generan principalmente en la etapa de almacenamiento del crudo de petróleo antes de ingresar al proceso de refinación, el cual es almacenado por un periodo aproximado de tres días a fin de sedimentar todas sus impurezas. Cabe indicar, que durante el proceso de refinación se eliminan componentes de la fracción asfalténica (altamente resistentes a la descomposición)

Las borras de hidrocarburos también se encuentran en los tanques de almacenamiento de residuales, equipos de centrifugación para la determinación de agua y sedimentos del crudo de petróleo, medios filtrantes, unidades de separación de petróleo y agua.

2.5. BIORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELOS.

La biorremediación está basada en la transformación del compuesto orgánico o hidrocarburo por acción de diversos microorganismos (bacterias, hongos y levaduras) en compuestos inocuos o de menor toxicidad como H_2O, CO_2 y biomasa (Ilustración 4).



Ilustración 4. Principios básicos de biorremediación. Fuente: (Casrrillo, 1998)

Adicionalmente los desechos metabólicos resultantes de la transformación de las cadenas de hidrocarburos en dichos componentes celulares son el O_2 y H_2.

Existen microorganismos con capacidad de degradar los hidrocarburos que se encuentran naturalmente en el suelo y poseen la capacidad metabólica necesaria para utilizar estos compuestos como fuente de energía para su crecimiento; mediante las reacciones de transformación y oxidación que se desarrollan durante la multiplicación celular la cual requiere como sustrato alimenticio materia orgánica con un alto contenido de carbono.

La totalidad de reacciones químicas que una célula es capaz de realizar constituyen el metabolismo, dicha función consiste en extraer energía del ambiente a partir de nutrientes orgánicos o de la luz, como efecto del metabolismo los nutrientes exógenos que en el caso de la biorremediación de suelos son compuestos hidrocarbonados, se convierten en compuestos intermedios o precursores de componentes macromoleculares de la estructura celular, que luego se transforman en proteínas celulares, enzimas, ácidos nucleicos, polisacáridos, lípidos y demás componentes celulares.

Cabe indicar, que las bacterias que crecen en presencia de hidrocarburos producen polisacáridos y glicolípidos los cuales actúan como solventes de los hidrocarburos.

Las enzimas responsables de la degradación de hidrocarburos son conocidas con el nombre de oxigenasas debido a que introducen uno o más átomos de oxígeno en el componente a degradar, siendo las enzimas a nivel microbiológico las catalizadoras de mayor eficiencia conocida hasta el momento. Cabe indicar, que los suelos tropicales al tener una alta diversidad y riqueza de especies de microorganismos permiten mantener altas tasas de biodegradación de los hidrocarburos, en comparación con las reportadas a otras latitudes.

Asimismo, no requiere la adición de microorganismos exógenos o foráneos, lo cual además de disminuir los costos de tratamiento elimina los riesgos ambientales. ***El sistema suelo es variable y está demostrado que las propiedades químicas que juegan un importante papel en los procesos de adsorción de contaminantes son el pH, la textura y la materia orgánica.***

Asimismo, este sistema es capaz de reaccionar frente al componente agresor activando mecanismos tales como el incremento de especies microbianas capaces de transformar moléculas complejas en sustancias inocuas, para ello actúan mecanismos de autoselección de especies.

2.5.1. Requerimientos básicos para que exista biodegradación en el suelo

Para que exista biodegradación del suelo se requiere de la presencia de microorganismos degradadores, adecuadas condiciones nutritivas (Carbono, Nitrógeno y Fósforo) y ambientales (temperatura y humedad) y ausencia de sustancias inhibidoras del crecimiento microbiano.

Además, es prioritario que las sustancias contaminantes estén disponibles al ataque microbiano, aspecto que es crítico ya que la mayor parte de los procesos biológicos en suelo son limitados por fenómenos de transporte de sustancias más que por limitantes biológicos, la razón de este fenómeno se atribuye principalmente a los equilibrios de adsorción-desorción y la distribución no homogénea del contaminante en la materia sólida.

En ese sentido, cuando el proceso degradativo no acontece espontáneamente se debe a que algunos factores están incidiendo negativamente como: contaminantes no biodegradable, carencia o deficiencia de microorganismos apropiados, inadecuadas condiciones nutritivo-ambientales o presencia de substancias inhibidoras del desarrollo microbiano y una alta concentración de contaminante.

Del mismo modo, las condiciones nutritivas (Carbono, Nitrógeno y Fósforo) en el medio a ser remediado tienen un efecto directo sobre los microorganismos nativos degradadores, la deficiencia de estos impide la actividad microbiana y un balance inapropiado reducirá el metabolismo degradador. La concentración de nitratos es uno de los parámetros principales en el

proceso de biorremediación, cabe indicar que el Nitrógeno se encuentra en diferentes formas químicas siendo el nitrato la forma química asimilada por las bacterias.

El rango normal de Carbono: Nitrógeno: Fósforo depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual la proporción de 100:10:1. Asimismo, las dos condiciones ambientales más comunes que pueden afectar la actividad enzimática y por tanto la actividad microbiológica son el pH y la temperatura.

El pH del suelo afecta significativamente la actividad microbiana, la solubilización y adsorción/absorción de los contaminantes y de los iones, siendo el pH óptimo para los procesos de biodegradación el neutro (7,4 – 7,8).

Del mismo modo, la temperatura es uno de los factores ambientales más importantes que afecta la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación, la mayor parte de estudios realizados indican que las condiciones mesofílicas (20 – 30 ºC) son las óptimas para la biorremediación de suelos contaminados.

Las herramientas con que se cuenta para inducir un proceso degradativo espontáneo en suelo son varias pero principalmente se pueden mencionar las siguientes: aireación por medio del laboreo u otro sistema, humectación controlada y la incorporación de fertilizantes para provisión de Nitrógeno y Fósforo. Si la concentración de hidrocarburos es elevado será necesario reducirla por dilución con suelo limpio y si la concentración de microorganismos no es suficiente será necesario incorporarlos.

Cabe indicar que la biodegradación empleada como técnica de biorremediación es netamente aeróbica, la mayor parte de hidrocarburos presentes en los productos petrolíferos son degradados con mayor extensión y rapidez de forma aeróbica (O_2 como aceptor final de electrones). La velocidad de degradación de los compuestos presentes en el petróleo son de la siguiente manera: hidrocarburos saturados mayor que los aromáticos ligeros y estos mayor que los aromáticos de alto peso molecular y estos mayor que los asfáltenos y resinas.

Asimismo, las parafinas de cadenas cortas son sustratos fácilmente degradables por los microorganismos, seguidos en orden descendiente por las parafinas de cadena larga, isoparafinas, cicloparafinas, aromáticos, heterocíclicos, resinas y asfáltenos. Además, los compuestos polares y los asfáltenos son generalmente considerados resistentes a la biodegradación y el material remanente se denomina Hidrocarburos Totales de Petróleo, el cual es considerado biodegradable.

El contenido de humedad es otro factor crítico, este varía dependiendo del tipo de suelo y de la capacidad intrínseca de retención de la humedad. La naturaleza del crudo o tipo de compuesto orgánico influye en la velocidad del proceso, así como por ejemplo compuestos saturados de

cadenas lineales son más fáciles de biodegradar que compuestos aromáticos de alta complejidad química. El rango de humedad óptimo es de 30 – 90 % de la capacidad de campo para la biodegradación aeróbica de lodos contaminados con crudo de petróleo.

Del mismo modo, la salinidad es un parámetro de interés para saber si hay un exceso que resultaría perjudicial a cualquier proceso biológico de remediación.

3. MARCO LEGAL

3.1. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL

En Colombia las normas pertinentes al manejo ambiental están basadas en la norma estadounidense Louisiana 29B.

- Norma Louisiana 29B: Esta norma estadounidense es la pionera de los de las reglamentaciones dadas a todas las actividades industriales que afectan al medio ambiente. Específicamente en el reglamento de Louisiana en su título 43, parte XIX, orden estatal 29B.

- Identificación y listado de Residuos Peligrosos: USEPA 40 CFR 261: Identification and listing of hazardous wate.

- Normas para generadores de residuos: USEPA 40 CFR 262: Standard applicable to wate generators.

- Normas para el manejo, almacenamiento, tratamiento y disposición de residuos: USEPA 40 CFR: Standards applicable toowners and operator of hazardous waste storage, treatment and disposal facilities.

- Convenio de Basilea. Secretariat of the Basel Convention, International Environment House, Switzerland. 1989 y ajustado y enmendado en 1992.

- Protocolo de Montreal para las sustancias que agotan la capa de ozono. Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme. 1987, ajustado y enmendado en 1990, 1992, 1995 y 1997.

3.2. LEGISLACIÓN NACIONAL

En el marco legal vigente en Colombia encontramos el decreto 4741 de Diciembre 30 del 2005 desarrollado parcialmente por la resolución del ministerio de Ambiente 1402 del 2006, la cual reglamenta la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos, y presenta el listado de residuos que a nivel nacional son considerado como peligrosos, en sus anexos 1 y 2, los cuales dicen que son residuos peligrosos las mezclas y emulsiones de desecho de aceite y agua o de hidrocarburos y agua, aspecto en el cual encajan los residuos tipo Borras de tanques de almacenamiento de la industria petrolera.

- Artículos 267 y 268 de la Constitución Política Colombiana alusivos al medio ambiente.

- Ley 99 de 1993.

- Decreto 2811 de 1974: Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

- Resolución 541 de 1994 del Ministerio del Medio Ambiente: por medio del cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de Escombros, Materiales, Elementos, Concretos y Agregados Sueltos de Construcción, de Demolición, de Capa orgánica, Suelo y Subsuelo de Excavación.

- Ley 253 de 1996: Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989.

- Decreto 321 de 1999: Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas.

- Decreto 2309 de 1986. Min Salud: Para manejo de residuos especiales.

- Decreto 1609 de 2002: Reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.

- Resolución 1045 de 2003: Se adopta la metodología para la elaboración de los planes de gestión integral de residuos sólidos.

- Decreto 1713 de 2002: Deroga parcialmente el Decreto 605/96. Gestión integral de residuos sólidos, recolección de basuras y disposición de residuos. Vigente régimen sancionatorio.

- Decreto 838 de 2005. Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.

- Decreto 4741 de 2005: Que reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

- Resolución 1362 de 2007: Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, a que hacen referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 de 2005.

- Ley 1252 de 2008: Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia Ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.

4. MARCO CONTEXTUAL

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este proyecto tomamos suelo limpio con cero cargas de contaminante Borra, proveniente de la finca la Bonita propiedad privada de la ingeniera de petróleos Constanza Vargas Castellanos, ubicada en la vía Santa Clara frente a la batería Santa Clara propiedad de Ecopetrol, cuyas coordenadas son (2°57'19.25"N, 75°19'50.61"O), siguiendo la ruta aproximadamente 10 minutos desviándose a mano izquierda de la vía Neiva-Bogotá, situada a 3.5 km del casco urbano de la ciudad de Neiva (ilustración 5) e (ilustración 6), basándonos en investigaciones antes realizadas (Sanchez Ortiz & Velasquez Olarte, 2018), (MENDEZ & TOVAR MUÑOZ, 2017), las cuales también hicieron sus estudios utilizando el mismo suelo.



Ilustración 5. Finca la Bonita. Fuente: (Sanchez Ortiz & Velasquez Olarte, 2018).



Ilustración 6. Imagen Aérea de la Finca la Bonita. Fuente Google Earth.

4.1.1. Antecedentes

El manejo inadecuado de las borras (fondos de tanques) por la alta producción mundial y nacional de hidrocarburos genera una problemática en cuanto a la disposición final de este tipo de desechos considerados tóxicos. Lo que más complica la problemática acerca de la disposición final de este tipo de desechos para la industria del petróleo, es que hasta hace pocos años prácticamente no existía una conciencia del grado de dificultad y del enorme costo que generaba remediar de alguna manera posible este tipo de desechos tóxicos, haciéndose patente que resulta más caro remediar que prevenir.

En este sentido, tanto a nivel nacional como internacional se han llevado a cabo métodos de biorremediacion por compostaje para el tratamiento de residuos sólidos y semisólidos generados en las refinerías de petróleo, teniendo como marco de selección aquella opción que permita reusar los residuos generados y minimizar los costos de tratamiento.

Estos estudios realizados demuestran que la biorremediacion aplicada a la descontaminación de suelos con moderado y alto contenido de hidrocarburos, realizando el seguimiento y control de procesos de remediación en función de parámetros como: %TPH, Nitrógeno Amoniacal, Fosforo disponible, y crecimiento poblacional de microorganismos aeróbicos. Obteniendo de esta manera una degradación de hidrocarburos de hasta un 90% dependiendo de la composición del petróleo y de la mezcla bacteriana utilizada.

Tal es el caso de (J.A, T, & C., 2005) los cuales estudiaron la biorremediacion de un lodo de refinería que contiene hidrocarburos, en un clima semiárido, utilizando técnicas de labranza de tierras, más conocido como Landfarming. Estos evaluaron el efecto de esta técnica sobre la actividad microbiana del suelo implicado, determinando parámetros bilógicos (fracciones de

carbono, la respiración basal y ATP) y parámetros químicos (diferentes actividades enzimáticas). Los resultados obtenidos mostraron que el 80% de los hidrocarburos se eliminaron en once meses, la mitad de esta reducción tuvo lugar durante los tres primeros meses.

Una experiencia similar se realizó en Arabia (R., T., & F., 2003), el cual se basó en la operación de labranza de tierra (Landfarming) de lodos aceitosos en regiones áridas y evaluaron el riesgo que ello tienen para la salud humana. Como conclusiones determinaron que esta tecnología se considera económica, eficiente en energía y amigable al medio ambiente, con un mínimo de problemas de disposición de residuos. También se observó la volatilización como el principal procesos de degradación de los hidrocarburos, lo que ocasiona un riesgo grave para la salud humana, ya que estos vapores llegan a la atmosfera en forma de gases tóxicos.

En otros procesos de biorremediacion y disposición final de borras en China (Liu, 2009) se llevaron a cabo parcelas preparadas utilizando métodos de composteo, con la influencia de estiércol, arena gruesa, aserrín, un consorcio microbiano especializado y condiciones de invernadero para la remoción de grasas y aceites. Después de 230 días de biorremediacion el aceite y el contenido de grasas se redujeron en 32-42 gr por Kg de lodo seco en las parcelas tratadas, lo que indico una reducción de 27-46%. Similarmente en china (W., y otros, 2004) compararon dos tecnologías de biorremediacion para determinar el mejor proceso en el tratamiento de lodos aceitosos. La biorremediacion por el aumento de biopreparado se comparó con un compostaje convencional. El contenido de hidrocarburos totales (%TPH) vario de 327,7 g/Kg a 371,2 g/kg de lodos seco y el %TPH del suelo contaminado fue de 151 g/kg. Se utilizó paja, aserrín, arena y parte superior del suelo puro en diferentes proporciones al lodo y el suelo y se mezclaron a fondo.

4.1.2. Características de las muestras y área de almacenamientos de las borras.

Las Borras utilizadas para este proyecto fueron suministradas por la estatal Ecopetrol en consorcio con la Universidad Surcolombiana por medio de la Ingeniería Constanza Vargas Castellanos. Las borras fueron almacenadas en una caneca para pintura en el laboratorio de lodos de la Universidad Surcolombiana (Ilustración 7). Se realizó la caracterización preliminar de la Borra a trabajar, con el fin de poder establecer el contenido de sedimentos BSW, grados API, gravedad Específica, viscosidad y salinidad. Los experimentos se realizaron aplicando las normas ASTM: D1298-99 para la medición de grados API, D4007-08 para la medición del contenido de agua y sedimentos y D1587-04 para la determinación de la viscosidad Saybolt y Furol. Se realizó también una prueba de retorta a la borra. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a las borras.

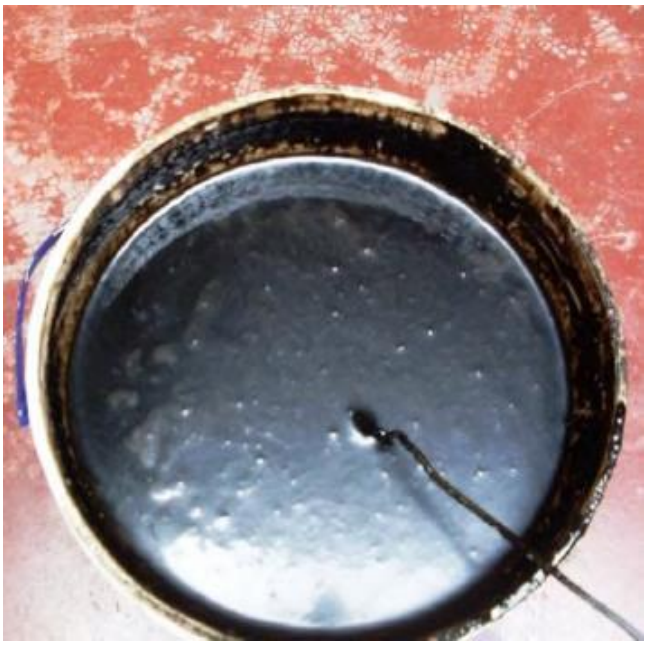


Ilustración 7. Caneca de pintura con las Borras del proyecto. Fuente: Autores.

Tabla 3. *Datos obtenidos de la caracterización de las Borras*

Propiedades	**Datos Obtenidos**
Densidad	8.323 lb/ galon
^{O}API	10.11
Viscosidad	70.82 cp @ T=122 F
Cantidad de sal	5.5 PTB
Cantidad de agua	11.32% p/p
Cantidad de crudo	36.6% p/p
Cantidad de solidos	52.8% p/p

Fuente: Autores

4.2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE BIORREMEDIACION

4.2.1. Actividades in situ

El lunes 15 de octubre se tomaron muestras representativas del suelo limpio de la finca La Bonita, propiedad privada de la ingeniera de petróleos Constanza Vargas Castellanos, tomando solo un punto de referencia, para la posterior caracterización del mismo (ilustración 8).



Ilustración 8. Toma de la muestra de suelo en la finca la bonita. Fuente: Autores.

En la tabla 4 se muestran los datos obtenidos de las propiedades físico-químicas del suelo limpio sin contaminación por borras. En el anexo A se muestran las pruebas realizadas a dicho suelo, con su respectiva descripción.

Tabla 4. *Muestra de suelo previo a la contaminación por Borras*

Color	**Light olive Brown**
Conductividad y Salinidad	255,0 mV
Densidad	1,26 gr/mL
Humedad	18%
pH	6,33
Porosidad	56,5
Tipo de Suelo	Franco arcillo arenosa

Fuente: Autores

4.2.1.1. Etapas del trabajo

Con el fin de determinar la viabilidad del proyecto y poder determinar los niveles de %TPH en el suelo contaminado con Borras, se desarrolló un diseño experimental ya propuesto por (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017) el día 18 de octubre del 2018, en donde se seleccionaron intervalos de tiempo específicos en los cuales se creía era evidente observar la acción del agente biodegradante en el suelo contaminado.

Para obtener valores comparativos se procedió a realizar pruebas de extracción %TPH por el método Gravimétrico Modificado por extracción con solvente a tiempo cero (0), de esta manera se obtuvo un valor procedente el cual sirvió de base para comparar los resultados obtenidos por (BERMEO & PEREZ HUEJE, 2017) posteriormente, con intervalos de tiempo escogidos aleatoriamente, estos tiempos fueron: 22, 35, 50, 98 días, (Tabla 5).

Tabla 5. *Datos a recolectar durante la disminución de %TPH del proyecto.*

Eras	**Disminución de %TPH**			
	22 días	35 días	50 días	98 días
1	-----	-----	-----	-----
2	-----	-----	-----	-----
3	-----	-----	-----	-----
4	-----	-----	-----	-----
5	-----	-----	-----	-----
6	-----	-----	-----	-----
7	-----	-----	-----	-----
8	-----	-----	-----	-----
9	-----	-----	-----	-----
10	-----	-----	-----	-----
11	-----	-----	-----	-----
12	-----	-----	-----	-----
13	-----	-----	-----	-----
14	-----	-----	-----	-----
15	-----	-----	-----	-----
16	-----	-----	-----	-----

Fuente: Autores

En la distribución del agente biodegradador, el suelo limpio y el agente contaminante (Borra), se optó por desarrollar un diseño en el cual la carga contaminante neta de hidrocarburos para todas las eras fuera de 5%, 10%, 20% y 30% respectivamente, de esta manera se obtuvo

cargas contaminantes de hidrocarburos para las diferentes eras de 22.4 gr, 44gr, 89gr, 133gr, equivalentes a 61.2 gr, 121.5gr, 243gr y 364.5 gr de Borras respectivamente para llegar después a la biorremediacion de cargas del 3% y 1% de %TPH permitido en suelos contaminados por crudos según la norma internacional (Louisiana 29B) , (tabla 6).

Tabla 6. *Distribución y composición de las eras.*

Relación Suelo-Abono	Abono(gr)	Suelo(gr)	Peso Crudo(gr)	Peso Borra(gr)
1:0.5	222.75	445.5	22.4	61.2
	222.75	445.5	44	121.5
	222.75	445.5	89	243
	222.75	445.5	133	364.5
1:1	445.5	445.5	22.4	61.2
	445.5	445.5	44	121.5
	445.5	445.5	89	243
	445.5	445.5	133	364.5
1:1.5	668.25	445.5	22.4	61.2
	668.25	445.5	44	121.5
	668.25	445.5	89	243
	668.25	445.5	133	364.5
1:2	891	445.5	22.4	61.2
	891	445.5	44	121.5
	891	445.5	89	243
	891	445.5	133	364.5

Fuente: Autores

Para realizar el montaje de las eras se escogió el laboratorio de Lodos ubicado en la Universidad Surcolombiana y dirigido bajo la supervisión de la ingeniera Constanza Vargas Castellanos.

Se dispuso a realizar el montaje de 16 eras (muestras) mezclando suelo-Abono-Borras en diferentes proporciones (Tabla 7) en recipientes de plástico ilustración 9, ilustración 10, ilustración 11, con dimensiones de 20 cm ancho, 30 cm de largo y 5 cm de alto. Durante el desarrollo de la práctica las eras (muestras) estuvieron expuestas a temperatura de laboratorio de 25 ^{o}C.

Tabla 7. *Relación Suelo – Abono.*

Carga Contaminante Borras(gr)	Relación Suelo – Abono			
	1 – 0.5	1 – 1	1 – 1.5	1 – 2
61.2	ERA 1	ERA 5	ERA 9	ERA 13
121.5	ERA 2	ERA 6	ERA 10	ERA 14
243	ERA 3	ERA 7	ERA 11	ERA 15
364.5	ERA 4	ERA 8	ERA 12	ERA 16

Fuente: Autores

Como base fundamental de este proyecto, se controló el pH y la humedad ideales para propiciar un buen crecimiento bacteriano, determinando de esta manera un rango de pH entre 6-8 y carga húmeda visible sin agua libre (Tabla 8). Se estableció un periodo de volteo a cada era de 3 minutos y la aplicación de agua en forma de roció diariamente, esto con el fin de incentivar el crecimiento bacteriano oxigenando las eras, creando un ambiente propicio para ellos.

Tabla 8. *Valores de carga contaminante, pH y Humedad de cada Era.*

ERA	CARGA CONTAMINANTE(gr)	pH	HUMEDAD
1	61.2	6	Visiblemente húmedo
2	121.5	8	Visiblemente húmedo
3	243	6	Visiblemente húmedo
4	364.5	8	Visiblemente húmedo
5	61.2	6	Visiblemente húmedo
6	121.5	8	Visiblemente húmedo
7	243	6	Visiblemente húmedo
8	364.5	8	Visiblemente húmedo
9	61.2	6	Visiblemente húmedo
10	121.5	8	Visiblemente húmedo
11	243	6	Visiblemente húmedo
12	364.5	8	Visiblemente húmedo
13	61.2	6	Visiblemente húmedo
14	121.5	8	Visiblemente húmedo
15	243	6	Visiblemente húmedo
16	364.5	8	Visiblemente húmedo

Fuente: Autores

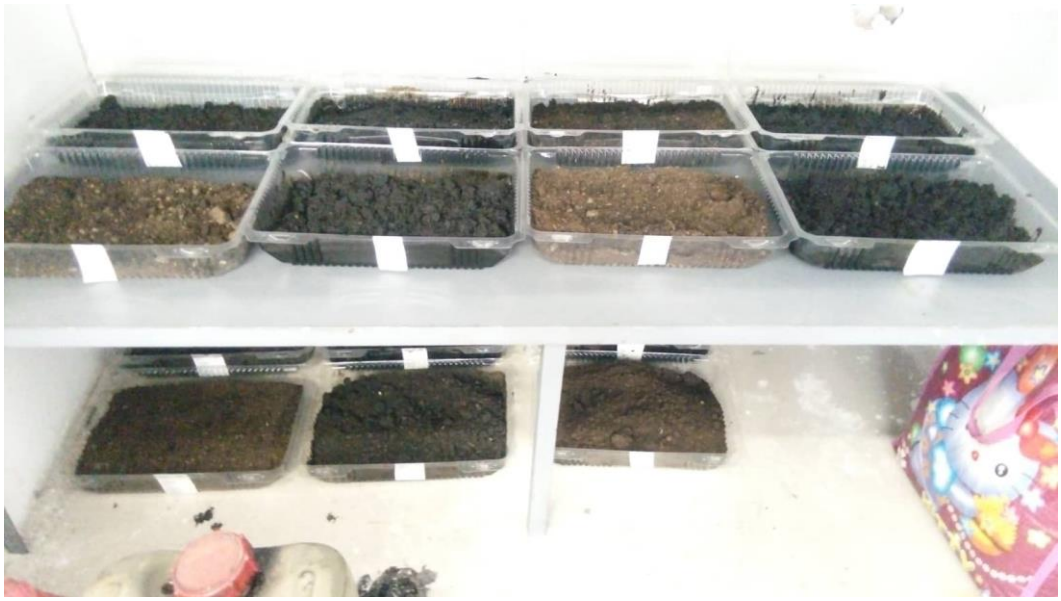


Ilustración 9. Montaje final de las eras contaminadas con borras 1. Fuente: Autores.



Ilustración 10. Monatje final de las eras contaminadas con borras 2. Fuente: Autores



Ilustración 11. Montaje final de las eras contaminadas 3. Fuente: Autores.

4.2.2. Actividades ex situ

Luego de realizado el montaje experimental mostrado en las ilustraciones 9,10 y 11, se procede a realizar la extracción de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) para observar como avanzaba el proyecto en los días propuestos (22, 35, 50, 98 días). Con base en el método gravimétrico modificado de extracción por solvente ya antes utilizado y demostrado su eficacia en proyectos anteriores (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017), (MENDEZ & TOVAR MUÑOZ, 2017) y (Sanchez Ortiz & Velasquez Olarte, 2018), se realizó la extracción de %TPH para cada era en los tiempos establecidos.

4.2.2.1. Procedimientos de laboratorio

El jueves 8 de noviembre del 2018 se decide realizar pruebas de extracción de %TPH en el laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Surcolombiana, bajo la dirección de la ingeniera Haydee Morales Mondragón. A continuación se procede a describir el paso a paso de las pruebas realizadas, con sus respectivos registros fotográficos:

Paso 1: Para que los valores de TPH fueran representativos y se pudiera establecer una disminución en su cantidad, se decidió tomar 5gr de cada muestra, ver ilustración 12.

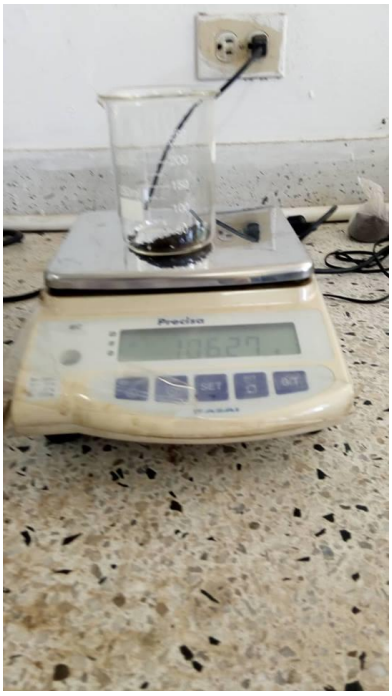


Ilustración 12. Muestra de 5g de era y Erlenmeyer, para el respectivo peso. Fuente: Autores.

Pasó 2: Los 5 gramos de muestra se mezclaron con agua destilada a una temperatura de 80 ^{o}C para facilitar la disgregación del aceite presente de la muestra, se agitó por cinco minutos constantemente. Luego se agregó 10 ml de cloroformo y se agitó durante 5 minutos, luego se agregó 10 ml más para facilitar la dilución del aceite presente en la muestra, ver ilustración 13, ilustración 14, ilustración 15.



Ilustración 13. Agua destilada en baño maría a 80 Celsius. Fuente: Autores

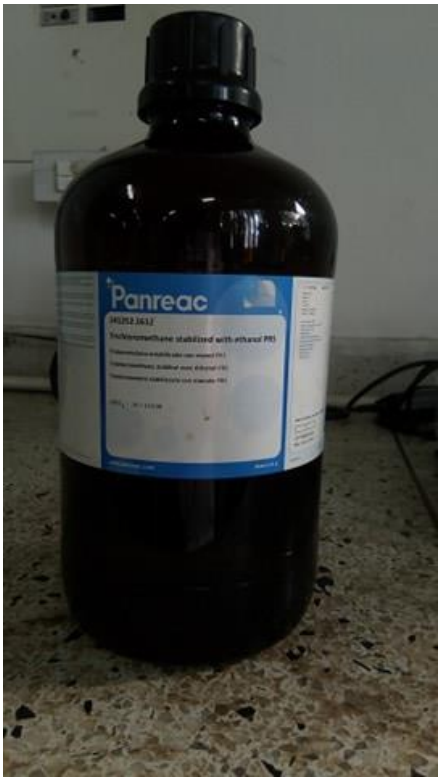


Ilustración 14. Cloroformo utilizado durante el proyecto. Fuente: Autores



Ilustración 15. Mezcla de agua destilada y muestras con los 20 ml de cloroformo. Fuente: Autores

Paso 3: Luego se procedió a decantar la grasa disuelta por el cloroformo y a filtrar la fase más liviana (mezcla de cloroformo y grasas) con tela muselina, dejando como residuo solidos los sedimentos presentes en la muestra como el suelo y el abono, ver ilustración 16, ilustración 17, ilustración 18.



Ilustración 16. Decantación de la muestra de las fases más livianas. Fuente: Autores



Ilustración 17. Filtración de la parte más liviana de la mezcla con muselina. Fuente: Autores



Ilustración 18. Resultado de la filtración con muselina. Fuente: Autores

Paso 4: Después de obtener la fase liviana de la mezcla se procede a realizar la evaporación del cloroformo y agua destilada por baño maría a una temperatura controlada de 60 ºC, para luego obtener simplemente los residuos de hidrocarburos presentes en cada muestra y determinar su peso en una balanza analítica, ver ilustración 19, ilustración 20, ilustración 21.



Ilustración 19. Resultado de las muestras obtenidas después de la filtración. Fuente: Autores



Ilustración 20. Baño maría para las muestras filtradas. Fuente: Autores



Ilustración 21. Muestras evaporándose con el baño maría 80 Celsius. Fuente: Autores

4.2.2.2. Variables utilizadas ene l modelo de predicción %TPH

Para poder determinar el porcentaje de hidrocarburos presentes en cada una de las eras después de realizar la extracción de %TPH por solvente, y poder establecer una relación de disminución entre el %TPH a tiempo cero (0) y los valores de %TPH en los tiempos preestablecidos, se realizaron balances estequiometricos con base en los cinco gramos escogidos de cada muestra. Para efecto de cálculos precedió a mostrar el balance estequiometrico para las primeras tres eras.

Muestra de cálculo para la Era 1:

$$Si\ 729.45\ gr\ de\ mezcla \rightarrow 100\%$$

$$22.4\ gr\ de\ HC \rightarrow ¿?$$

$$\%TPH = \frac{22.4\ gr\ de\ HC\ x\ 100\%}{729.45\ gr\ mezcla} = 3.1\%\ TPH \qquad \text{Ec. 1}$$

Muestra de cálculo para la Era 2:

$$Si\ 789.75\ gr\ de\ mezcla \rightarrow 100\%$$

$$44\ gr\ de\ HC \rightarrow ¿?$$

$$\%TPH = \frac{44\ gr\ de\ HC\ x\ 100\%}{789.75\ gr\ mezcla} = 5.6\%\ TPH$$

Muestra de cálculo para la Era 3:

$$Si\ 911.25\ gr\ de\ mezcla \rightarrow 100\%$$

$$89\ gr\ de\ HC \rightarrow ¿?$$

$$\%TPH = \frac{89\ gr\ de\ HC\ x\ 100\%}{789.75\ gr\ mezcla} = 9.8\%\ TPH$$

De esta manera se realizó el balance de materia para cada una de las eras determinando el porcentaje de %TPH real dentro de cada mezcla.

5. MARCO EXPERIMENTAL

5.1. VARIABLES UTILIZADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN

Como se había mencionado en el capítulo Método Experimental de este proyecto se debe obtener valores iniciales de %TPH a tiempo cero (0) para compararlos con los valores %TPH obtenidos en los otros tiempos y de esta manera tener un control y un conocimiento de la evolución de la eras realizadas.

5.1.1 Datos utilizados en el modelo

Para la realización de la primera prueba y determinar el %TPH a tiempo cero (0) se acudió al laboratorio de Crudos y Derivados, en donde se realizaron todas las pruebas dirigidas bajo la supervisión de la Ingeniera Hayde Morales Mondragón.

Tabla 9. *Resultados prueba 1, tiempo cero (0) días*

ERA	Recipiente Vacío(gr)	Recipiente+ Residuo(gr)	HC(gr)	%TPH
1	70.09	70.34	0.155	5
2	70.54	71.04	0.28	10
3	73.09	74.09	0.49	20
4	71.7	73.2	0.65	30
5	71.62	70.33	0.12	5
6	72.06	71.04	0.22	10
7	71.97	74.08	0.4	20
8	73.37	73.18	0.53	30
9	72.71	70.34	0.1	5
10	71.74	71.04	0.18	10
11	72.41	74.84	0.33	20
12	72.3	73.2	0.451	30
13	73.39	70.34	0.08	5
14	72.7	71.037	0.1525	10
15	72.44	74.09	0.281	20
16	73.08	73.2	0.392	30

Fuentes: (Autores)

Una vez obtenidos los resultados de la prueba a tiempo cero (0) se determinó que aún no presentaban signos de biorremediacion en ninguna de las eras, este resultado era de esperarse ya que la carga contaminante de Borras contiene gran cantidad de hidrocarburos, agua y sedimentos,

lo que hace más difícil el proceso de biorremediacion en un periodo tiempo largo, esto en base a resultados obtenidos en trabajo anteriores a este proyecto.

Se decidió realizar la siguiente prueba para 22 días después, descartando la posibilidad de una disminución significativa de hidrocarburos en las eras, los resultados obtenidos para la prueba 2 se encuentran en la tabla 9.

Tabla 10. *Resultados prueba 3, tiempo 22 días*

ERA	Recipiente Vacío(gr)	Recipiente+ Residuo(gr)	HC(gr)	%TPH
1	70.09	70.24	0.15	3
2	70.54	70.82	0.28	5.6
3	73.09	73.57	0.48	9.6
4	71.7	72.35	0.65	13
5	71.62	71.68	0.06	1.2
6	72.06	72.19	0.13	2.6
7	71.97	72.27	0.3	6
8	73.37	73.9	0.53	10.6
9	72.71	72.79	0.08	1.6
10	71.74	71.91	0.17	3.4
11	72.41	72.52	0.11	2.2
12	72.3	72.75	0.45	9
13	73.39	73.47	0.08	1.6
14	72.7	72.8	0.1	2
15	72.44	72.6	0.16	3.2
16	73.08	73.29	0.21	4.2

Fuente: Autores

En los resultados de la prueba número 2, se observa que las eras con alta relación Abono-Suelo presentaban una disminución de %TPH muy rápida, pero las eras con relaciones bajas de Abono-Suelo e incluso las primeras 4 eras no presentaban disminución significativa de %TPH, por lo tanto se decidió realizar la prueba numero 3 quince días después, los datos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. *Resultados prueba 3, tiempo 37 días*

ERA	Recipiente Vacío(gr)	Recipiente+ Residuo(gr)	HC(gr)	%TPH
1	70.09	70.19	0.1	2
2	70.57	70.84	0.27	5.4
3	73.07	73.4	0.33	6.6
4	71.73	72.25	0.52	10.4
5	71.61	71.66	0.05	1
6	72.09	72.2	0.11	2.2
7	72.04	72.26	0.22	4.4
8	73.36	73.84	0.48	9.6
9	72.7	72.74	0.04	0.8
10	71.75	71.84	0.09	1.8
11	72.41	72.45	0.04	0.8
12	72.31	72.66	0.35	7
13	73.42	73.46	0.04	0.8
14	72.72	72.77	0.05	1
15	72.44	72.55	0.11	2.2
16	73.11	73.3	0.19	3.8

Fuente: Autores

Ya para los 35 días de haber empezado el diseño experimental propuesto en el capítulo Diseño Experimental de este proyecto, se observó que los valores de %TPH de las eras con carga mínima de Borra siguen disminuyendo incluso con valores por debajo de uno, pero las eras contaminadas con cargas altas de Borras y haciendo mención a las primera 4 eras no presentaban una disminución significativa de %TPH, se decidió realizar la prueba número 4 quince días después, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. *Resultados prueba 4, tiempo 50 días*

ERA	Recipiente Vacío(gr)	Recipiente+ Residuo(gr)	HC(gr)	%TPH
1	70.09	70.16	0.07	1.4
2	70.51	70.64	0.13	2.6
3	73.02	73.27	0.25	5
4	71.73	72.12	0.39	7.8
5	0	0	0	ND
6	72.04	72.13	0.09	1.8
7	71.97	72.16	0.19	3.8
8	73.29	73.69	0.4	8
9	0	0	0	ND

10	71.73	71.78	0.05	1
11	72.4	72.4	0	0
12	72.27	72.49	0.22	4.4
13	0	0	0	ND
14	0	0	0	ND
15	72.44	72.53	0.09	1.8
16	73.11	73.28	0.17	3.4

Fuente: Autores

ND: No detectable

Los resultados obtenidos para el día 50 muestran un panorama muy alentador, ya que la mayoría de la eras presentan una disminución significativa de valores de %TPH, solo las eras con mayor carga contaminante de borra presentan un valor alto con respecto al pretendido de 3% y 1% %TPH, solo la era numero 4 presenta un valor de 7% TPH, lo cual es un valor de carga contaminante muy alto.

Como se había mencionado en (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017) algunos compuestos presentan dificultad de degradarse. Como en este proyecto vemos que la era 4 presenta aun dificultad para degradarse se decidió realizar la última prueba a la evaluación de %TPH para las eras que aún les faltaba alcanzar los valores deseados en el día 98, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. *Resultados prueba 5, tiempo 98 días*

ERA	Recipiente Vacío(gr)	Recipiente+ Residuo(gr)	HC(gr)	%TPH
1	70.09	70.09	0	ND
2	70.55	70.57	0.02	0.4
3	73.04	73.04	0	ND
4	71.73	71.8	0.07	1.4
5	0	0	0	ND
6	72.08	72.09	0.01	0.2
7	71.99	72	0.01	0.2
8	73.32	73.35	0.03	0.6
9	0	0	0	ND
10	0	0	0	ND
11	72.41	72.41	0	ND
12	72.3	72.3	0	ND
13	0	0	0	ND
14	0	0	0	ND
15	72.45	72.45	0	ND
16	73.1	73.1	0	ND

Fuente: Autores

En la determinación de la cantidad de %TPH poderlos comparar con los valores obtenidos anteriormente en cada prueba se realizó una serie de balances estequiometricos para cada muestra, a continuación mostramos los balances estequiometricos de las primeras tres eras de la serie 2 de resultados obtenidos.

Muestra cálculo para la muestra 1:

$$Si\ 5\ gr\ de\ mezcla \rightarrow 100\%$$

$$0.15\ gr\ de\ HC \rightarrow ¿?$$

$$\%TPH = \frac{0.15\ gr\ de\ HC\ x\ 100\%}{5\ gr\ mezcla} = 3\%\ TPH$$

Muestra de cálculo para la muestra 2:

$$Si\ 5\ gr\ de\ mezcla \rightarrow 100\%$$

$$0.28\ gr\ de\ HC \rightarrow ¿?$$

$$\%TPH = \frac{0.28\ gr\ de\ HC\ x\ 100\%}{5\ gr\ mezcla} = 5.6\%\ TPH$$

Muestra de cálculo para la muestra 3:

$$Si\ 5\ gr\ de\ mezcla \rightarrow 100\%$$

$$0.48\ gr\ de\ HC \rightarrow ¿?$$

$$\%TPH = \frac{0.48\ gr\ de\ HC\ x\ 100\%}{5\ gr\ mezcla} = 9.6\%\ TPH$$

De esta manera realizamos los balances estequiométricos en cada uno de los resultados obtenidos, para cada muestra en todos los resultados obtenidos.

Durante la realización del proyecto en su etapa de biorremediacion se percibió cambios notables en el color del suelo de las eras con baja concentración de borras después de los 20 días de realizado el diseño experimental. En la eras con alto grado de concentración de borras no se evidencio cambio en su color y olor después del día 50.

6. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Para llegar a los valores de concentración de hidrocarburos totales de petróleo (%TPH) debemos tener en cuenta la carga de hidrocarburos presentes en cada una de las eras, esto con el fin de obtener valores de referencia con los cuales se podrá trabajar y dar un análisis detallado de la forma como se remedia el suelo contaminado. La carga contaminante de hidrocarburos presente en cada era se encuentra representada en el Gráfico 1.

6.1 ANALISIS DE LAS MUESTRAS

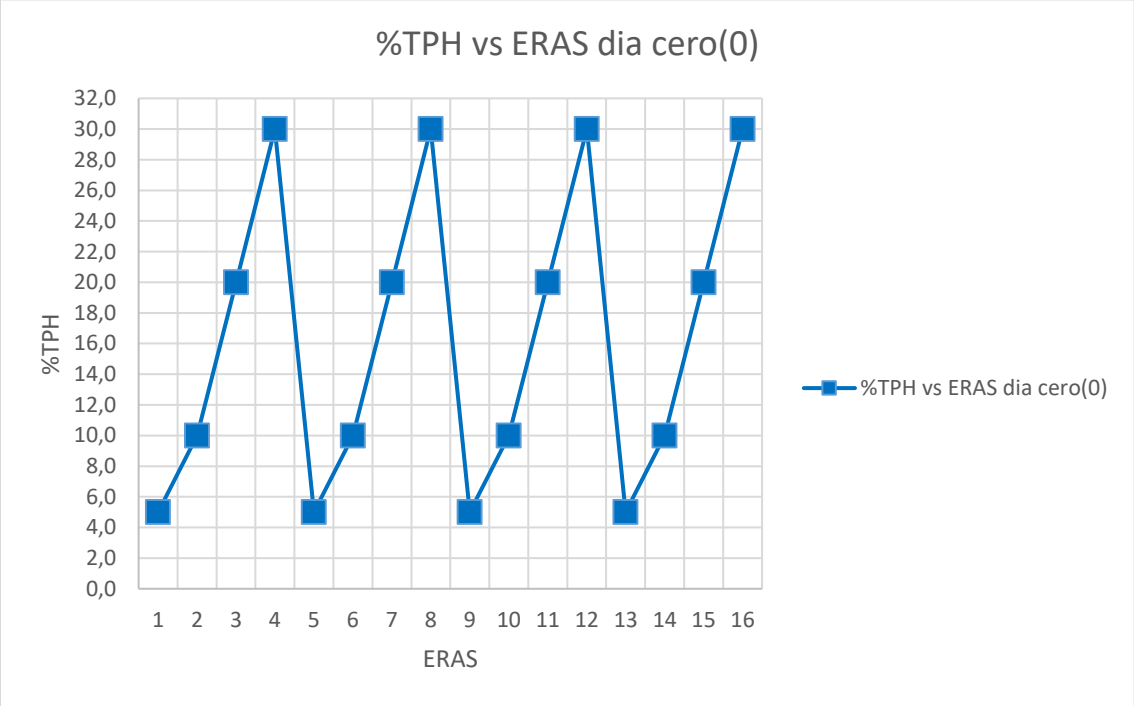


Grafico 1. %TPH vs eras para el día cero (0)

Durante los primeros 22 días de haber realizado la contaminación por Borras a cada una de los suelos presentes en las eras y de haber realizado el segundo procedimiento de extracción de %TPH, se observó una disminución de hidrocarburos no tan drástica en las eras 5, 6, 7, 14, pero si una disminución de hidrocarburos significativas en las eras 11, 15 y 16 (Grafico 2), con una relación abono-suelo en la era 11 de 1.5:1 y las eras 15 y 16 del orden de 2:1, lo cual es sorprendente porque estas eras presentan altas cargas de contaminantes por borras y un alto grado de hidrocarburos. En las primeras cuatro eras se observó que no presentan cambio alguno y en cuestión son la eras con relaciones bajas de abono- suelo del orden de 0.5:1 (Grafico 3).

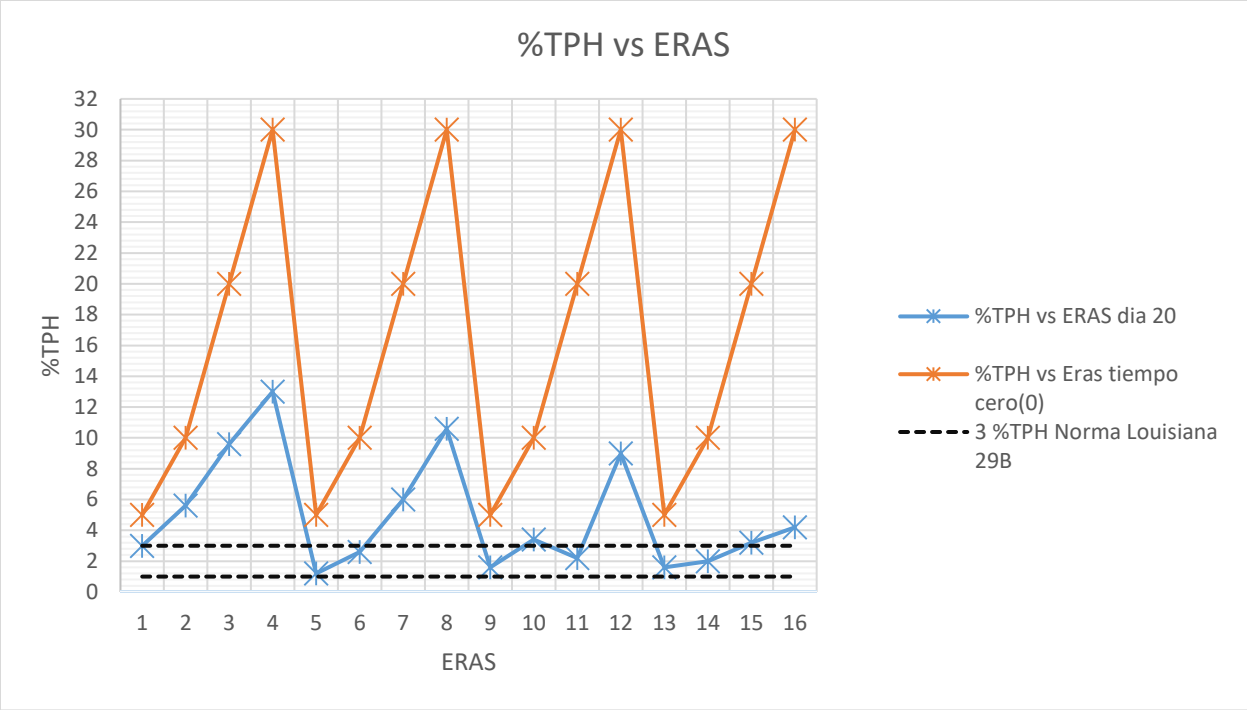


Grafico 2. %TPH vs eras para el día 22.

.

A los 35 días de haber realizado el diseño experimental se empezó a observar una disminución notable en los hidrocarburos presentes en las eras, (Grafico 3), incluso en aquellas con relaciones bajas de abono-suelo las cuales son las primeras cuatro eras. En este periodo de tiempo las eras 5, 9, 11 y 13 ya están por debajo del 1% de concentración de hidrocarburos totales de petróleos (%TPH). Las era 14 ya se encuentra por debajo de los 3% de TPH y está muy cercano al 1% TPH, las eras 15 y 16 siguen presentando disminución de %TPH significativa pero aun no llegan a los valores establecidos.

Las eras 4, 8 y 12 siguen presentando un alto grado de concentración de %TPH pero sus valores siguen disminuyendo.

Se evidencia que la eficiencia de eliminación del %TPH fue más rápida durante los primeros 35 días del proyecto, en la eras 5, 9, 11 y 13 y un alto rendimiento de degradación de %TPH en la era 11 por parte del abono Ceagrodex. Un patrón similar con la eliminación más rápida de hidrocarburos durante los primeros 40 días de las etapas ha sido evidenciado en trabajos anteriores.

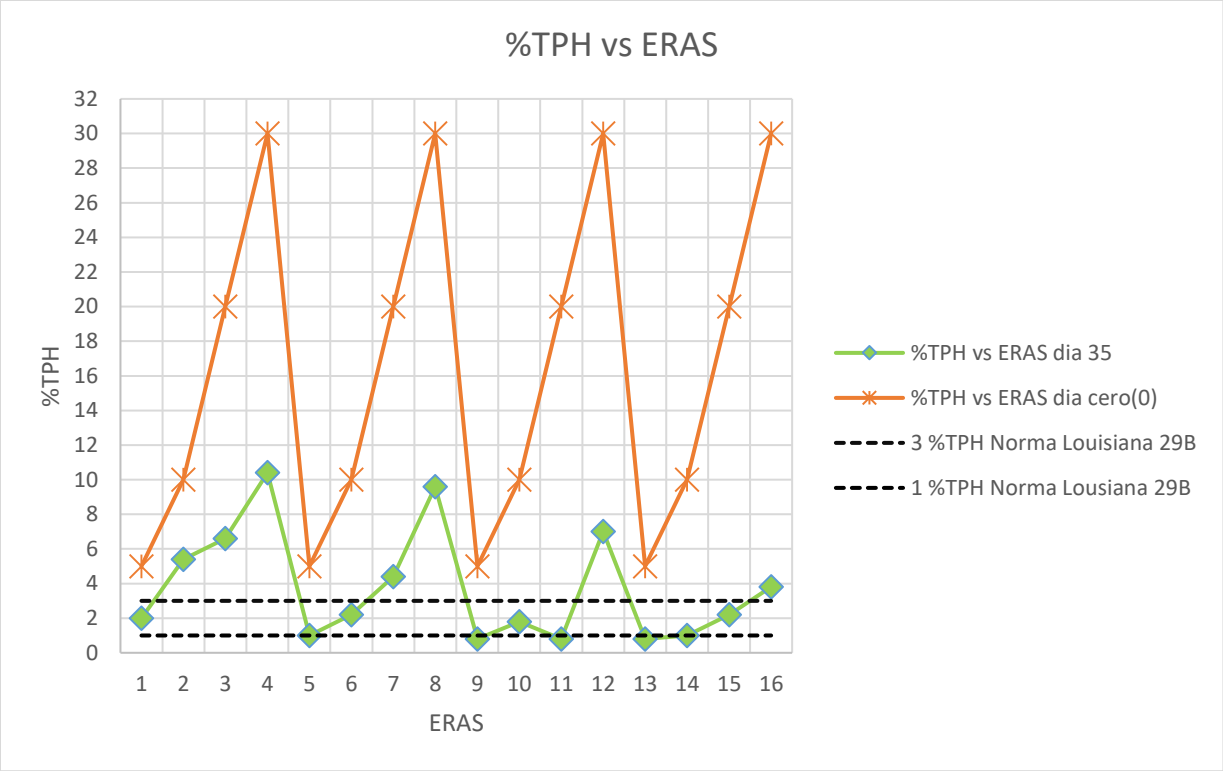


Grafico 3. %TPH vs eras día 35.

La diminución en los niveles de concentración de %TPH en cada una de las eras al pasar el tiempo demuestra que la población bacteriana presente en las muestras crecen gracias a las condiciones favorables de temperatura, humedad y pH y los aportes de Nitrógeno (N) y Fosforo (P) contenidos en el abono Ceagrodex y el suelo, estos elementos junto con el carbono (C) presente en el hidrocarburo sirven como alimento para la nutrición bacteriana (Liu, 2009).

En el día 50 (Grafico 4) las eras 1, 5, 9,13 y 14 ya han alcanzado los valores 3% y 1% y la contaminación por hidrocarburos no es detectable (ND). Las eras 2, 3, 6, 7, 15 y 16 presentan valores cercanos al 3% de TPH. Las eras 4 y 8 aun presentan valores altos de contaminación de hidrocarburos pero su valor sigue descendiendo.

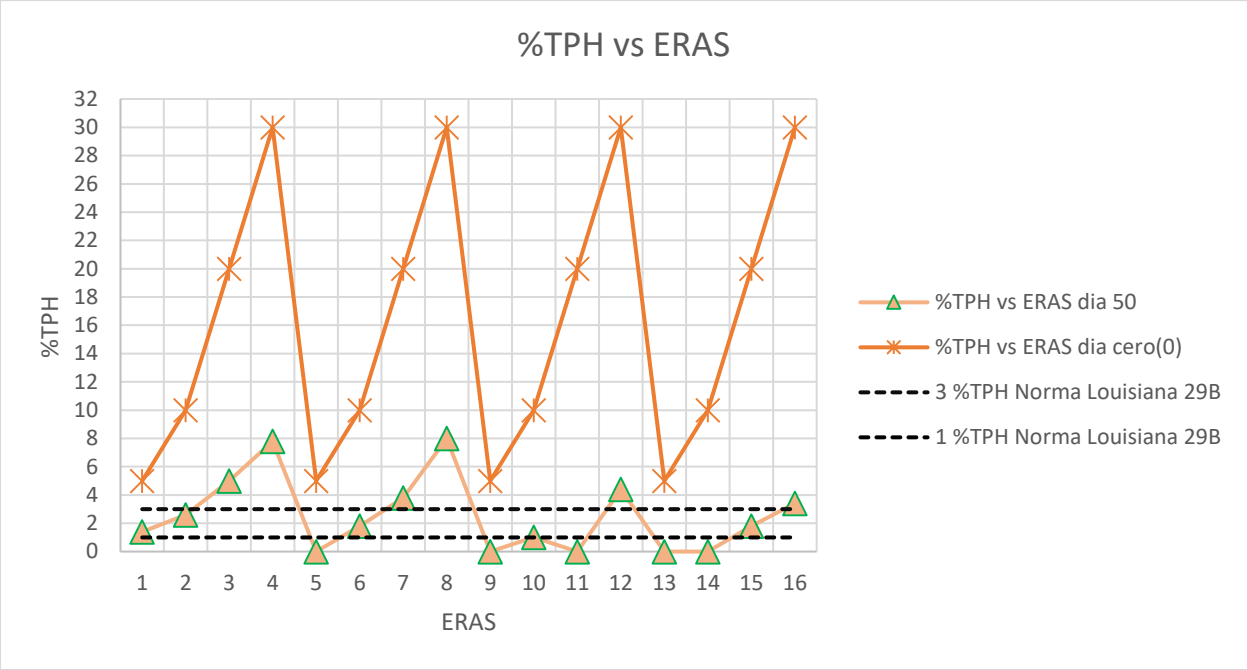


Grafico 4. %TPH vs eras día 50.

Después de tres meses de haber iniciado el proyecto y haber ejecutado el diseño experimental los porcentajes de hidrocarburos presentes en la eras llegan a los niveles deseados de 3% y 1% (Grafico 5). Todas las eras presentan niveles no detectables de hidrocarburos excepto la era número 4. Esta era presento el nivel más alto de hidrocarburos en su mezcla y un nivel 0.5:1 relación Abono-Suelo.

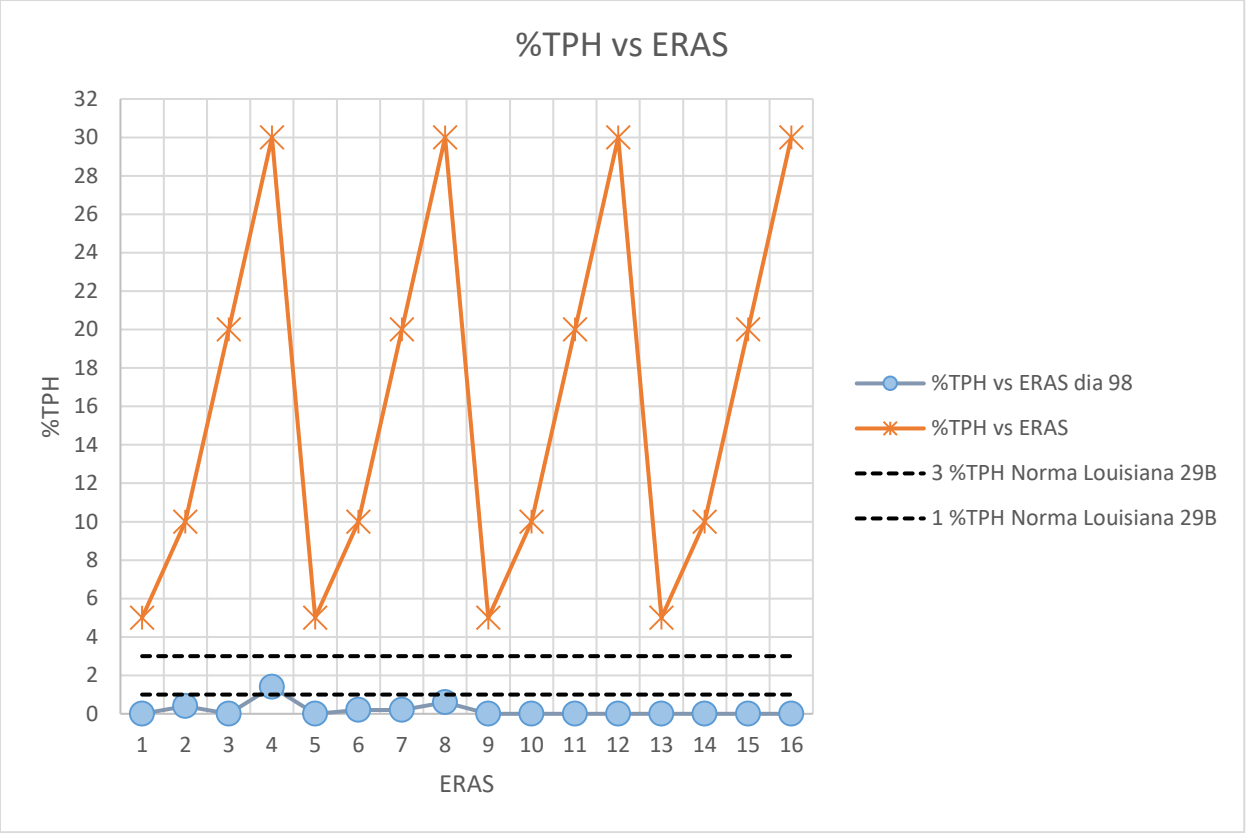


Grafico 5. %TPH vs eras día 98.

El comportamiento durante el proceso de biorremediacion en promedio para todas las eras fue el mismo (descendente). Las eras con bajos porcentajes de contaminación por borras tuvieron una eficiencia de biorremediacion mejor y mucho más rápidas en comparación con las eras que presentaron una alta contaminación por borras para las distintas proporciones Abono-Suelo propuestas.

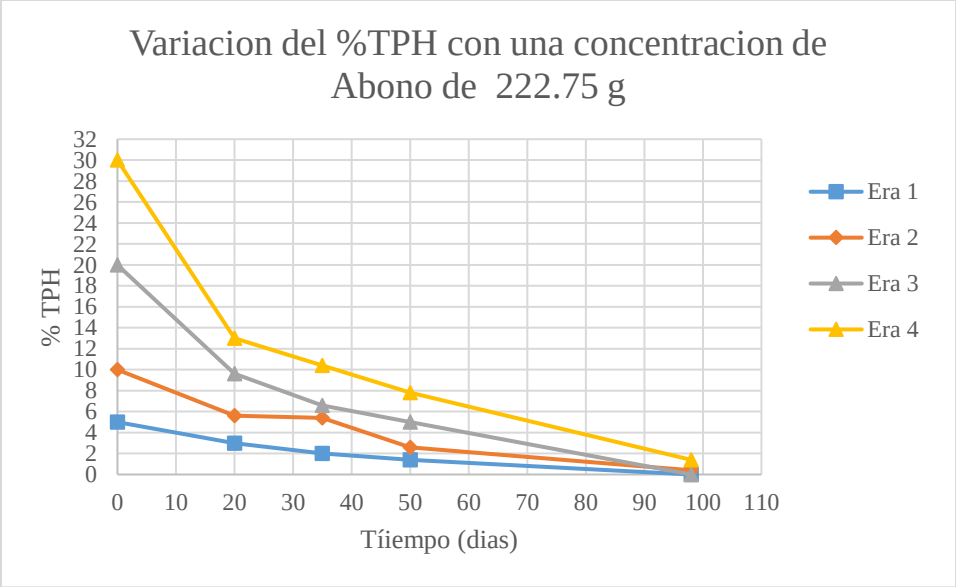


Grafico 6. Variación del %TPH para relación Abono-Suelo 0.5-1.

Durante la biorremediacion de las eras con relación Abono-Suelo 0.5-1 (Grafico 6), la era con mejor rata de biorremediacion fue la Era 1 puesto que tenía menor contaminación por borras, del orden de un 3 % TPH, su eficiencia de remoción fue del 34.56% en los primeros 35 días.

La segunda era tuvo una eficiencia de remoción de hidrocarburos del 4.1% durante los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, con un porcentaje inicial de 5.6% TPH.

La tercera era tuvo una eficiencia de remoción de hidrocarburos del 32.37 % durante los primero 35 días de la etapa de biorremediacion para la relación Abono-Suelo 0.5-1, siendo esta la segunda mejor para esta relación, con un porcentaje inicial del 9.8% TPH.

La cuarta era tuvo una eficiencia de remoción de hidrocarburos del 19.48 % durante los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion siendo esta la más baja para la relación Abono-Suelo 0.5-1, con un porcentaje inicial del 13% TPH. De hecho esta era fue la que más dificultades presento durante la etapa de biorremediacion, y no logro alcanzar el objetivo de quedar por debajo del 1% TPH reglamentario.

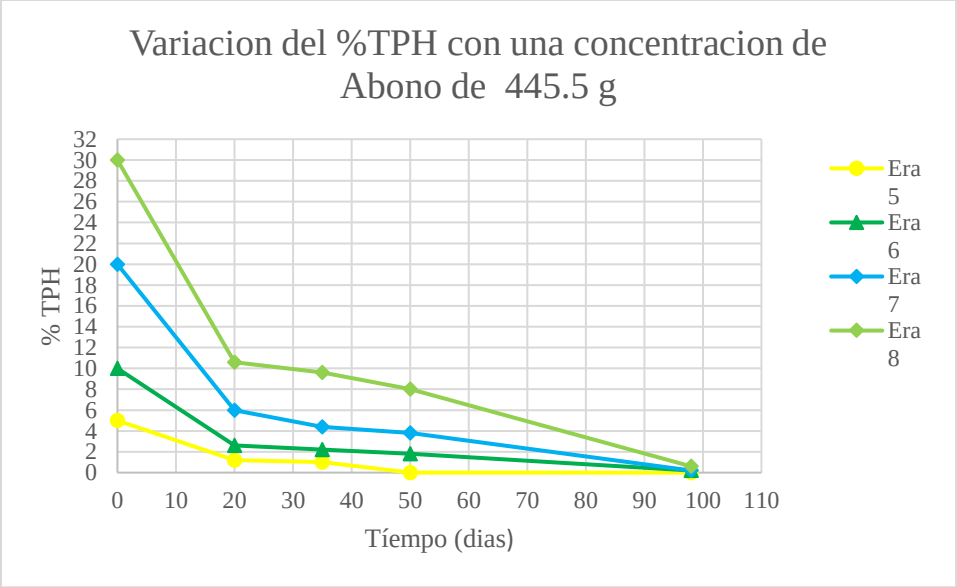


Grafico 7. Variación %TPH para relación Abono-Suelo 1-1.

Para la era 5 con una relación Abono-Suelo 1-1 su eficiencia de remoción fue del 57,48 % (Grafico 7) durante los primeros 35 días, siendo esta la mejor para esta relación, con un porcentaje inicial de 2.4 % TPH siendo la más baja para esta relación.

La era 6 tuvo una eficiencia de remoción del 45 % para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo esta la segunda mejor en esta relación Abono-Suelo, con un porcentaje inicial de 4.4 %TPH.

La era 7 tuvo una eficiencia de remoción del 43% para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo esta la tercera mejor para esta relación, con un porcentaje inicial de 8% TPH.

La era 8 tuvo una eficiencia de remoción del 9.65 % para los primero 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo esta la más baja de esta relación, con un porcentaje inicial de 10.6 %TPH.

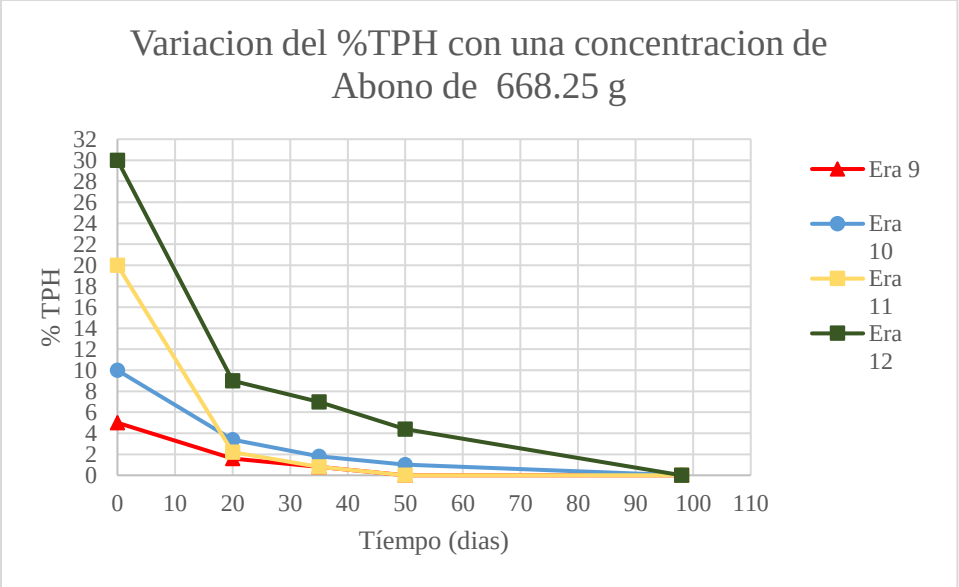


Grafico 8. Variación %TPH para una relación Abono-Suelo 1.5-1.

Durante la etapa de biorremediacion para la relación Abono-Suelo 1.5-1 la era 9 fue la segunda mejor, con una eficiencia de remoción de 58,03 % (Grafico 8) para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion y un porcentaje inicial de 2% TPH.

La era 10 tuvo una eficiencia de remoción del 50% para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo esta la tercera mejor para esta relación con un porcentaje inicial de 3.6 %TPH.

La era 11 tuvo una eficiencia de remoción del 87.8% para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo esta la primera mejor para esta relación Abono-Suelo y la mejor de todo el proyecto con un porcentaje de inicial de 6.6 %TPH.

La era 12 tuvo una eficiencia de remoción del 22.43% para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo esta la más baja de esta relación Abono-Suelo con un porcentaje inicial 9.02 %TPH.

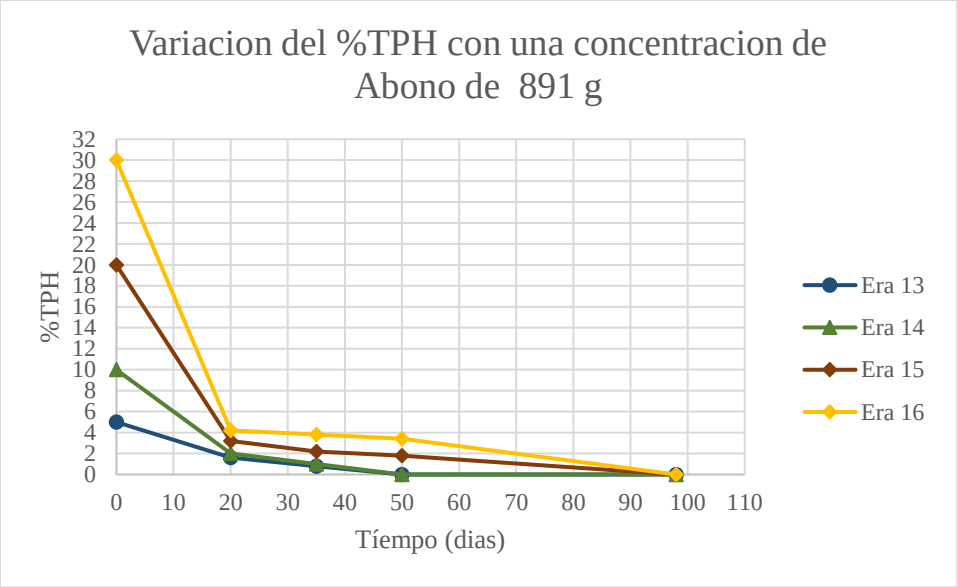


Grafico 9. Variación %TPH para una relación Abono-Suelo 2-1.

Para la relación Abono-Suelo 2-1 la era 13 tuvo una eficiencia de remoción del 50,08 % (Grafico 9) para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo la más baja para esta relación con un porcentaje inicial de 1.6 %TPH.

La era 14 tuvo una eficiencia de 67.21% para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo la mejor para esta relación Abono-Suelo con un porcentaje inicial de 3.05 %TPH.

La era 15 tuvo una eficiencia de 60.92 % para los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo la segunda mejor para esta relación Abono-Suelo con un porcentaje inicial de 5.63 %TPH.

La era 16 tuvo una eficiencia de 51,54% durante los primeros 35 días de la etapa de biorremediacion, siendo la tercera mejor para esta relación Abono-Suelo con un porcentaje inicial de 7.84 %TPH.

Los niveles de %TPH llegaron a los estándares requeridos por la normativa nacional como internacional (Louisiana 29B), con suelos limpios de carga contaminantes por borras e hidrocarburos (Grafico 10).

Las eras contaminadas con bajos niveles de borras y las eras con altos niveles de concentración de abono obtuvieron en los primeros 35 días altos rendimientos de biorremediacion, destacando el abono Ceagrodex como un agente biorremediador eficaz el cual, con las condiciones necesarias incentiva el aumento poblacional de bacterias presentes en el suelo remediado.

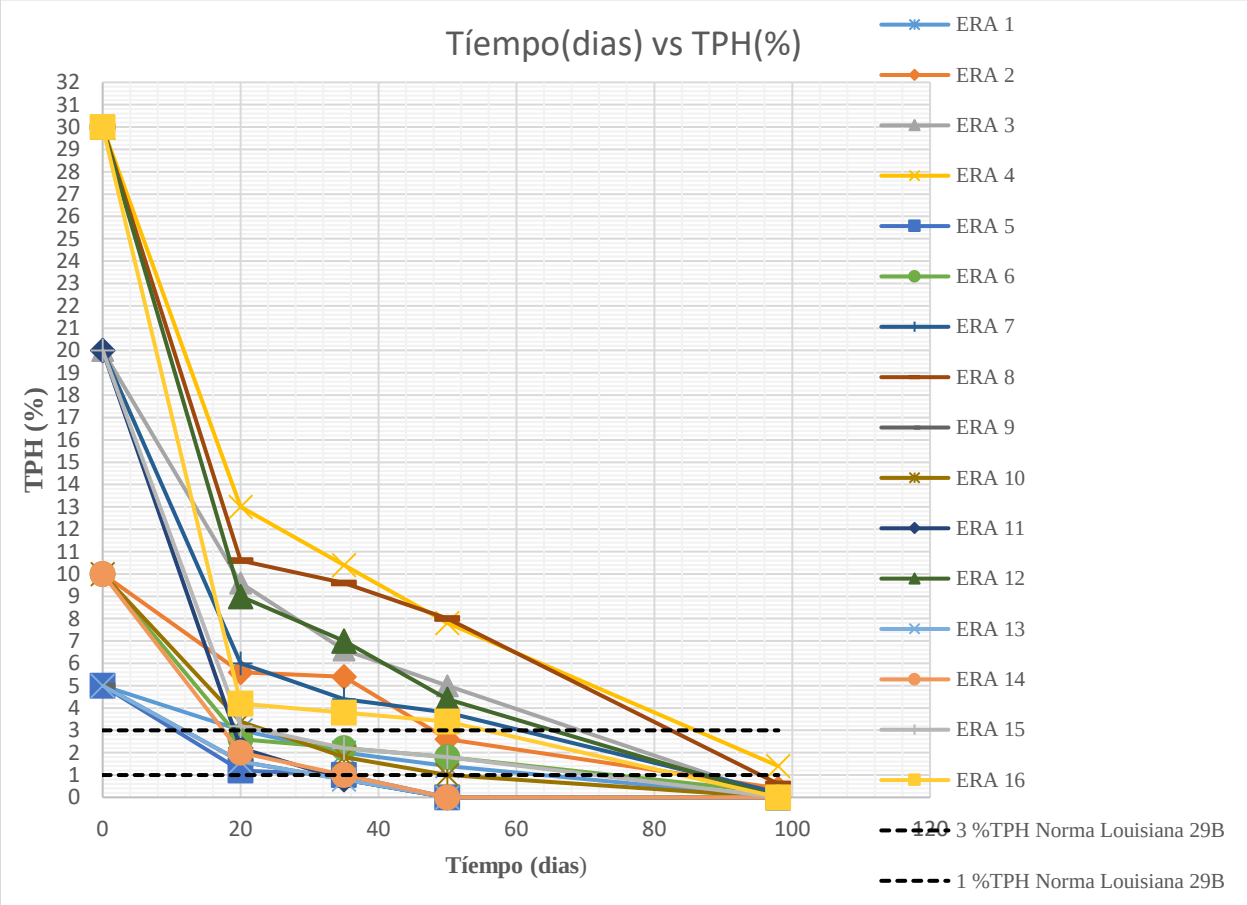


Grafico 10. %TPH vs tiempo.

6.1.2. Caracterización de suelo remediado

Después del proceso de biorremediacion por parte del abono Ceagrodex se decidió realizar pruebas al suelo remediado para saber en qué propiedades habían cambiado y que influencia tenía en estas el abono Ceagrodex, estas propiedades comparativas al suelo antes y después de la biorremediacion son presentadas en la tabla 14.

.

Tabla 14. Comparación de las propiedades del suelo utilizado en el proyecto antes y después de la remediación.

Propiedades	Suelo antes de remediar	Suelo remediado
Color	Light olive Brown	Dark yellowish brown
Conductividad	255,0 mV	222 mV
Densidad	2,23 gr/mL	1.78 g/ml
Humedad	3.9%	24
pH	6,33	7
Porosidad	43,5	42.4 %
Tipo	Franco arcillo arenosa	Franco arenoso

Fuente: Autores.

Como el tiempo en el proceso de biorremediacion no fue igual para todas las eras, las características de estas como su color y el olor característico de la borra mezclada fueron desapareciendo con el tiempo. Las diferentes eras presentaron características similares en cuanto a su olor y propiedades como el pH y la humedad, pero su color fue variado. Por lo tanto se tomó como referencia para la evaluación de las propiedades del suelo remediado la era 11, la cual presento características diferentes durante todo el proyecto, ver Ilustración 22.



Ilustración 22. Eras después de 98 días de la biorremediación.

6.2. ANÁLISIS RATA DE BIODEGRADACION.

6.2.1. Análisis era 11

Como una manera de interpretar la eficacia de Bioestimulación y Biodegradación por parte del abono Ceagrodex para este proyecto, se hizo un análisis a grosso modo de la era 11 (Grafico 11), la cual obtuvo una eficiencia de remediación alta y fue la mejor en comparación con las demás eras.

Con un porcentaje inicial de 243 g de Borras, 89 g de hidrocarburos (6.6 %TPH) y una relación Abono-Suelo de 1.5-1, esta era presento tasas de eficiencia en remoción de hidrocarburos del 66.43% (Grafico 12) durante los primeros 22 días, llegando por debajo del valor inicial del 3 %TPH. En un periodo de tiempo de 35 días la era 11 presento una eficiencia de remoción de hidrocarburos del 87.8 % (Grafico 13), alcanzando valores por debajo del 1 %TPH. Este comportamiento puede ser influenciado por muchas razones. Una de estas puede ser que hubo una alta disponibilidad de biodegradación de los diferentes componentes de hidrocarburos presentes en las Borras para la era 11 y una baja disponibilidad de ellos en las eras con bajos porcentajes de eficiencia como la era 4.

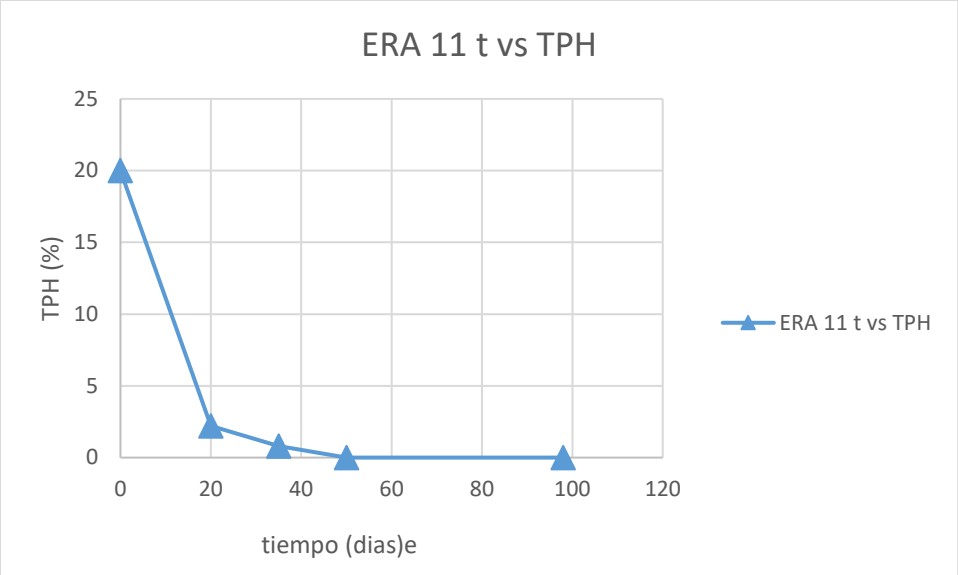


Grafico 11. Rata de biorremediacion era 11.

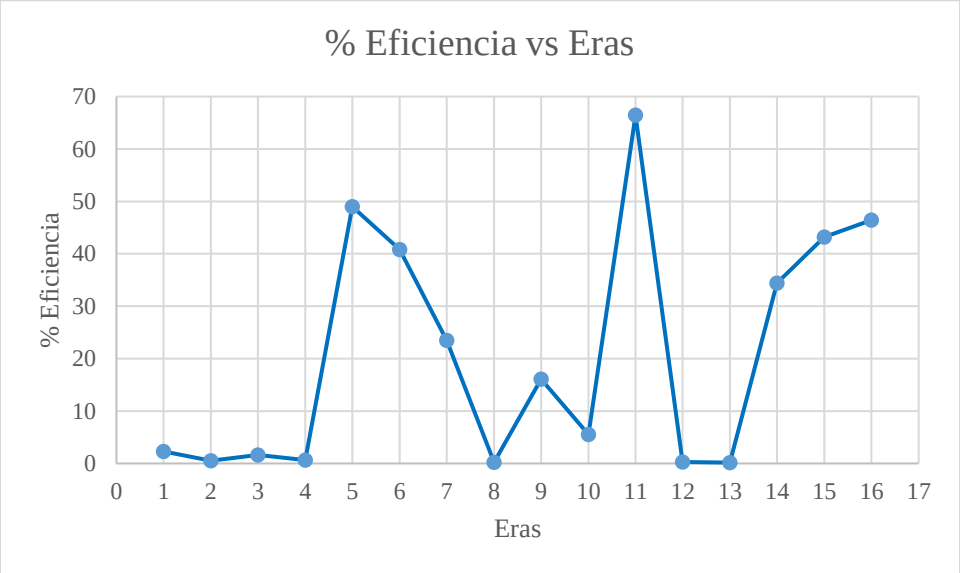


Grafico 12. Eficiencia en cada era, día 22.

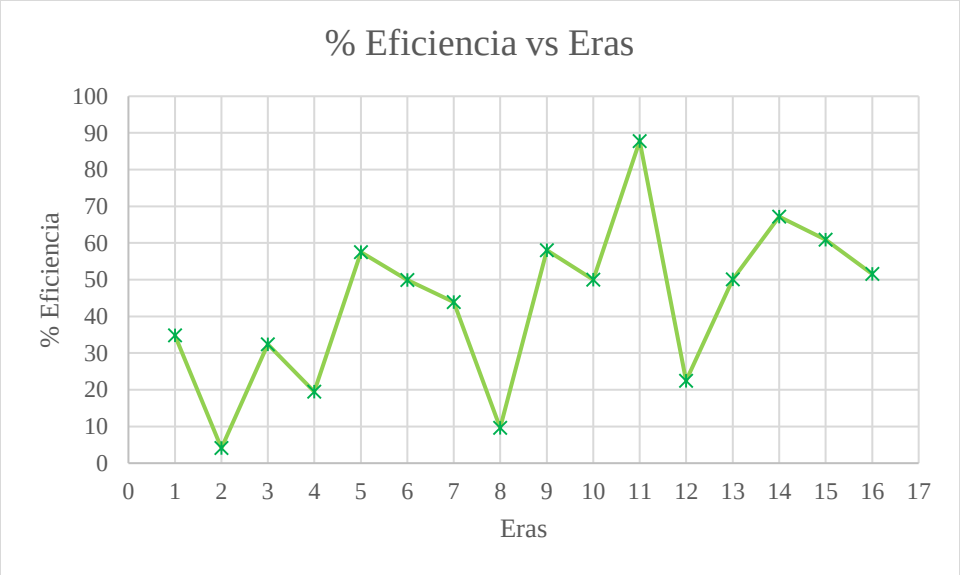


Grafico 13. Eficiencia en cada era, día 35.

Durante el proyecto las eras 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15 y 16 tuvieron un comportamiento similar cuando se acercaban a un rango entre 7 y 6 % TPH, Grafico 14, Grafico 15, Grafico 16, Grafico 17, Grafico 18, Grafico 19, Grafico 20, Grafico 21, tal y como se ha descrito en otros estudios, la cinética de degradación de contaminantes orgánicos en suelos, habitualmente muestra una fase inicial de biodegradación rápida seguido de un periodo con pequeños o inexistentes cambios de las concentraciones residuales (Cuartas, 2012).

En el caso de la era 11 esta cinética es conocida como el fenómeno del "palo de hockey" (Grafico 11), esta dinámica puede ser causada por una disminución de los nutrientes, por la disminución de la población microbiana, por la baja biodisponibilidad de componentes orgánicos, por las condiciones fisicoquímicas desfavorables, un aumento de la recalcitrancia de los contaminantes residuales o que los suelos contaminados ya no contienen hidrocarburos (Cuartas, 2012).

Aunque este comportamiento es típico de crecimiento bacteriano de tipo exponencial tanto para la era 11 como para las demás eras en métodos de compostaje por abonos en tratamientos de suelos, no siempre se cumple y en trabajos anteriores incluso es contradictorio, en donde las condiciones de degradación no se dan por la baja disponibilidad de los hidrocarburos presentes y que las condiciones de humedad y temperatura no son favorables para la biorremediacion (Liu, 2009), (Mrayyan & N. Battikhi, 2004), (MISHRA, JYOT, C. KUHAD, & LAL, 2001).

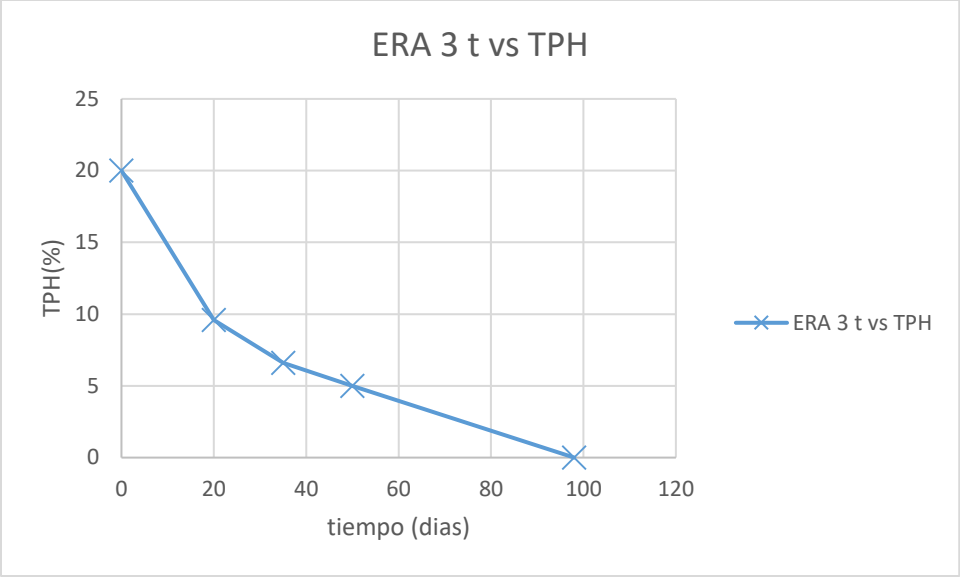


Grafico 14. Rata de biorremediacion era 3. Fuente: Autores

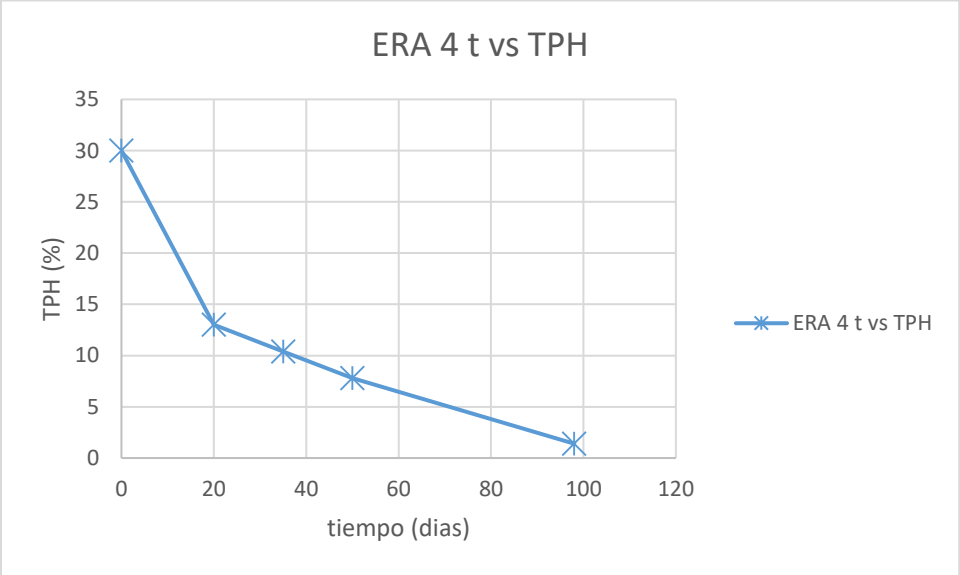


Grafico 15. Rata de biorremediacion era 4. Fuente: Autores.

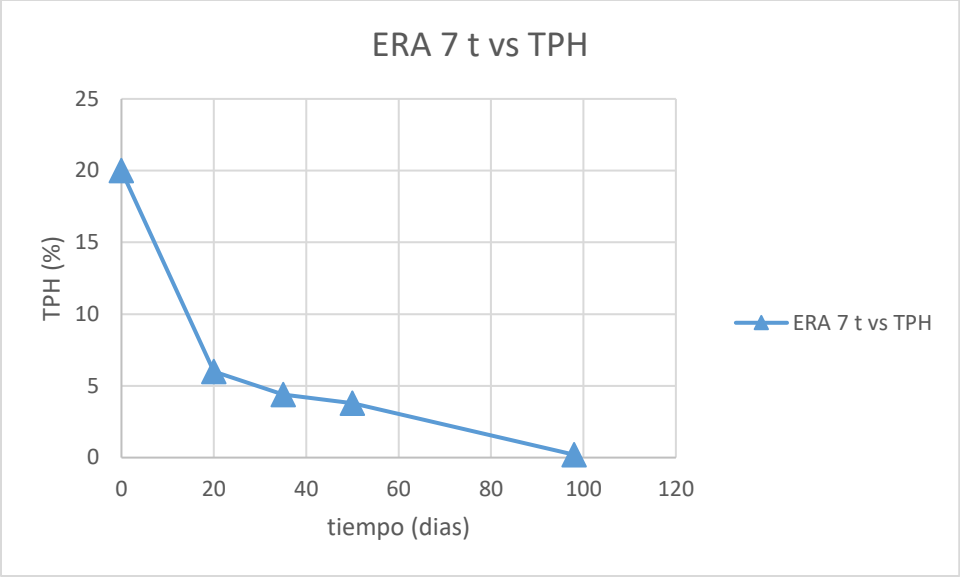


Grafico 16. Rata de biorremediacion era 7. Fuente: Autores.

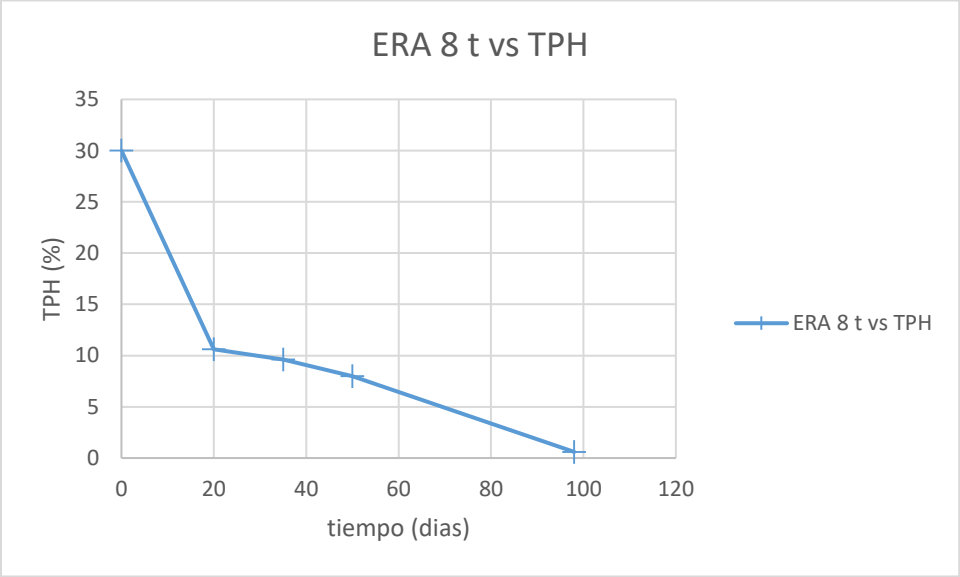


Grafico 17. Rata de biorremediacion era 8. Fuente: Autores.

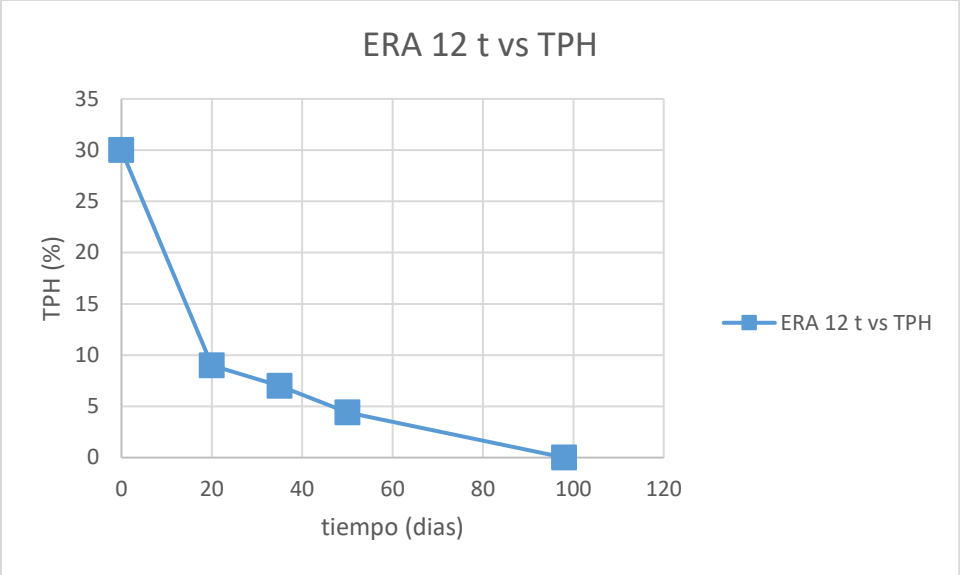


Grafico 18. Rata de biorremediacion era 12. Fuente: Autores.

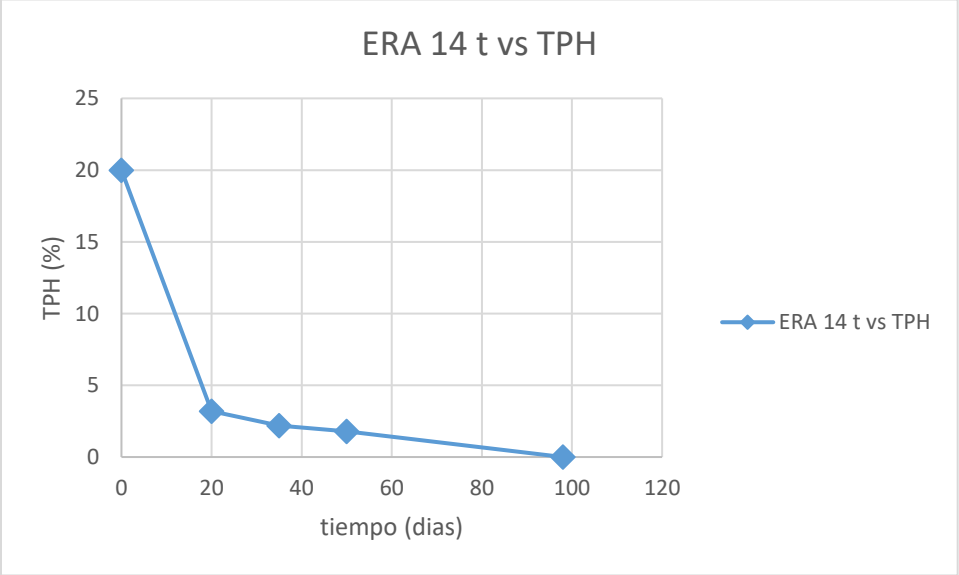


Grafico 19. Rata de biorremediacion era 14. Fuente: Autores.

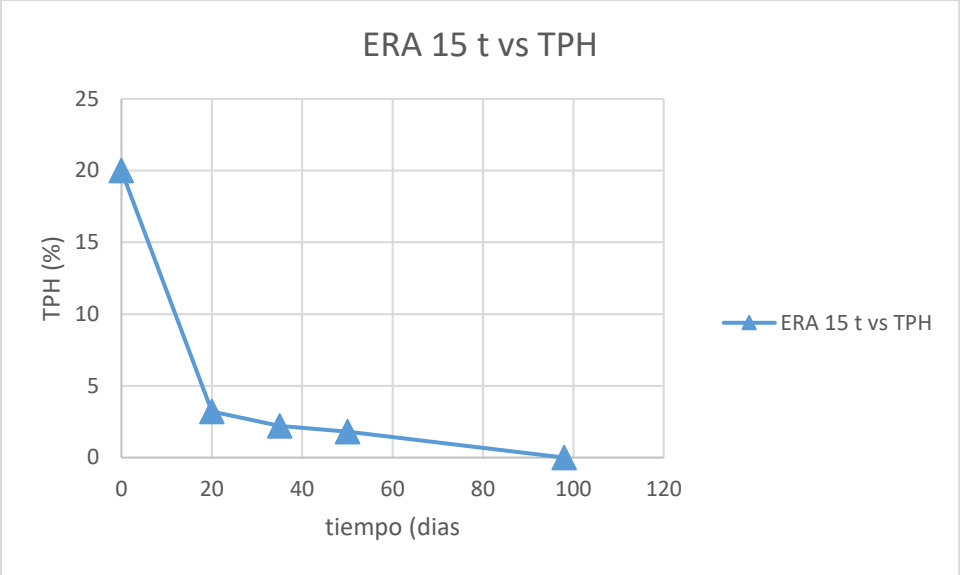


Grafico 20. Rata de biorremediacion era 15. Fuente: Autores.

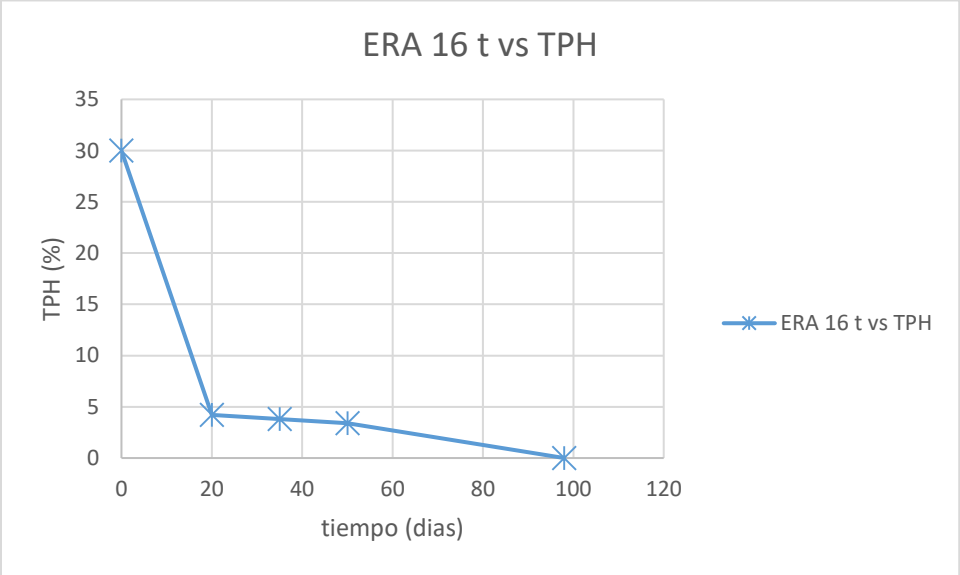


Grafico 21. Rata de biorremediacion era 16. Fuente: Autores.

6.2.2. Nutrientes.

La Biodegradación de los hidrocarburos está asociado con el metabolismo y crecimiento, y por lo tanto cualquiera de los factores que afecta el crecimiento microbiano como los nutrientes, la oxigenación, la temperatura, el pH y la humedad (Ilustración 23), puede influenciar en la degradación (Vásquez, 2008). La adición de concentraciones altas o moderadas de fuentes de nitrógeno (N) y fosforo (P) originan cambios en la población microbiana y aumenta la degradación

de hidrocarburos favoreciendo el crecimiento de especies dominantes (Cuartas, 2012), ya que estos junto con el Carbono (C) forman parte de la composición elemental de las bacterias degradadoras de Hidrocarburos (Ilustración 24), (Ilustración 25).

Elemento	Porcentaje en peso seco	Función fisiológica
Carbono	50	Constituyente del material orgánico de la célula
Oxígeno	20	Constituyente del material orgánico de la célula y del agua celular
Nitrógeno	14	Constituyente de las proteínas, ácidos nucleicos y coenzimas
Hidrógeno	8	Constituyente del material orgánico de la célula y del agua celular
Fósforo	3	Constituyente de los ácidos nucleicos, fosfolípidos y coenzimas
Azufre	1	Constituyente de las proteínas y coenzimas
Potasio	1	Catión principal en procesos celulares
Sodio	1	Catión principal en procesos celulares
Calcio	0.5	Catión principal en procesos celulares y cofactor de enzimas
Magnesio	0.5	Catión principal en procesos celulares, cofactor en reacciones ATP
Cloro	0.5	Catión principal en procesos celulares
Hierro	0.2	Constituyente de enzimas y proteínas
Σ Elementos traza	0.3	Constituyentes inorgánicos de enzimas especiales

Ilustración 23. Composición elemental típica de células bacterianas en base seca. Fuente: (Introducción a los Biorreactores, Capitulo 8, s.f.)

Bacterias			Hongos		
Achrornobacter	Leumthrix	Xanthomyces	Allescheria	Oidiodendrum	Gonytrichum
Acinetobacter	Moraxella	Lactobacillus	Aspergillus	Paecylomyses	Hansenula
Actinomyces	Nocardia	Erwinia	Aureobasidium	Phialophora	Helminthosporium
Aeromonas	Peptococcus	Flavobacterium	Botrytis	Penicillium	Torulopsis
Alcaligenes	Pseudomonas	Klebsiella	Candida	Rhodosporidium	Trichoderma
Arthrobacter	Sarcina	Coryneforms	Cephalosporium	Rhodotorula	Trichosporon
Bacillus	Spherotilus	Vibrio	Cladosporium	Saccharomyces	Fusarium
Beneckea	Spirillum		Cunninghamella	Saccharomyco-pisis	Sporobolomyces
Brevebacterium	Streptomyces		Debaromyces	Scopulariopsis	

Ilustración 24. Organismos degradadores de Petróleos. Fuentes: (Toro & Quirama., 2012).

Microorganismo	Composición elemental
Candida utilis	$CH_{1.83}O_{0.46}N_{0.19}$
Klebsiella aerogenes	$CH_{1.75}O_{0.43}N_{0.22}$
Saccharomyces cerevisiae	$CH_{1.82}O_{0.58}N_{0.16}$
Escherichia coli	$CH_{1.94}O_{0.52}N_{0.25}P_{0.025}$
Pseudomonas fluorescens	$CH_{1.93}O_{0.55}N_{0.25}P_{0.021}$
Aerobacter aerogenes	$CH_{1.83}O_{0.55}N_{0.26}P_{0.024}$
Penicillium chrysogemun	$CH_{1.64}O_{0.52}N_{0.16}$
Aspergillus niger	$CH_{1.72}O_{0.55}N_{0.17}$
Promedio	$\mathbf{CH_{1.81}O_{0.52}N_{0.21}}$

Ilustración 25. Composición elemental de biomasa para diferentes especies bacterianas. Fuente: (Introducción a los Biorreactores, Capitulo 8, s.f.)

La era 11 contiene 17.1072 g de nitrógeno (N) y 17.09383 g de fosforo (P) provenientes del abono Ceagrodex (Tabla 15). Estos nutrientes junto con el Oxigeno sirven como base fundamental para el metabolismo de los microorganismos degradadores de hidrocarburos (Ilustración 25), puesto que forman relaciones C/N y C/P necesarios para el crecimiento microbiano (Romero, y otros, 2008).

Tabla 15. Aporte nutricional por parte del abono al suelo en cantidades iguales.

Nutrientes	**% en 50 Kg (1 Bulto)**	**Gramos en 50 Kg(1 Bulto)**
Nitrógeno Total(N_2)	2.56	1280
Fosforo Total(P_2O_5)	2.558	1279
Potasio(K_2O)	0.517	258.5
Sodio(Na)	1.056	528
Calcio(Ca)	2.45	1225

Fuente: (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017).

Tabla 16. Aporte nutricional del abono de acuerdo a la relación abono-suelo manejando el diseño experimental.

Relación Abono-Suelo	Cantidad de Suelo(gr)	Cantidad de Abono(gr)	Cantidad de Nutrientes(gr)				
			Nitrógeno (N_2)	Fosforo (P_2O_5)	Potasio (K_2O)	Sodio (Na)	Calcio (Ca)
(0.5-1)	445.5	222.75	5.7024	5.697945	1.1516175	2.35224	5.457375
(1-1)	445.5	445.5	11.4048	11.39589	2.303235	4.70448	10.91475
(1.5-1)	445.5	668.25	17.1072	17.093835	3.4548525	7.05672	16.372125
(2-1)	445.5	891	22.8096	22.79178	4.60647	9.40896	21.8295

Fuente: Tomado de (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017)

En la realización de este proyecto no se determinaron la cantidad de carbono que contenían estas borras puesto que no se hicieron pruebas afines. Sin embargo el abono Ceagrodex presenta una relación C/N de 14.5 y carbono orgánico oxidable total de 27.7% (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017), concentraciones que ayudarían en el proceso metabólico microbiano. Se han establecido teóricamente rangos de relaciones C: N: P de 100:10:1, 100:1:0.1 o 100:2:0.2, en donde las concentraciones de nitrógeno (N) y fosforo (P) deben ser altas, de lo contrario una baja concentración de estos nutrientes producirían relaciones C/N y C/P muy altas, lo cual no sería muy favorable para el crecimiento microbiano (Romero, y otros, 2008).

6.2.3. Microbiología

De igual forma como no se realizaron pruebas de análisis microbiológico ni pruebas a fin al suelo contaminado se puede ver que el abono Ceagrodex contiene 1.8E+10 UFC/g de microorganismo Mesófilos, 2.10E+11 UFC/g de microrganismo Termófilos y 1.00E+10 UFC/g de Mohos (Tabla 17).

Tabla 17. Microorganismo Presentes en abono Ceagrodex.

Mesófilos (Ufc/g)	Termófilos (Ufc/g)	Mohos (Ufc/g)	Levaduras (Ufc/g)	Nematodos y/o Protozoos	Entero Bacterias (Ufc/g)	Salmonella en 25 g
1.8+E10	2.10E+11	1.00E+10	0.00E+00	Ausentes	0.00E+00	ausentes

Fuente: (Bermeo Cruz & Perez Hueje, 2017)

Los microorganismos Mesófilos crecen en un rango de temperatura entre 15 y 45 ^oC siendo el rango optimo entre 25 y 35 ^oC, mientras que los termófilos tienen un buen desarrollo entre los 45 a 65 ^oC (Introduccion a los Biorreactores, Capitulo 8, s.f.).Se cree que los principales microorganismo que intervinieron en la degradación de los suelos contaminado con borras para

este proyecto fueron los Mesófilos ya que las eras estuvieron siempre expuestas a temperatura ambiente que varía entre los 25 a 40 ^{o}C.

Sin embargo dentro del proceso de liberación de energía de activación que generan las bacterias al inicio del tratamiento de compostaje , se cree también que la temperatura pudo haber aumentado en un rango superior a los 40 ^{o}C, permitiendo de esta manera que los organismo Termófilos intervinieran en el proceso de biodegradación en la era 11 presentes en el abono Ceagrodex, y en las que también tuvieron un alto rendimiento de degradación durante los primeros 35 días, eras 5, 6, 14, 15 y 16 (Vicente, Carrasco, & Negro, 1996), aunque esto no fue detectable durante el transcurso del proyecto.

.

7. CONCLUSIONES

- Se evaluó la efectividad del abono Ceagrodex como agente biorremediador en suelos contaminados por Borras, logrando determinar su efectividad, puesto que al contener los nutrientes necesario como el Nitrógeno (N) y el fosforo (P), propicio un ambiente ideal con condiciones de pH, humedad y temperatura para el agrupamiento y crecimiento de colonias bacterianas las cuales desempañaron un papel importante en el rompimiento de enlaces entre los hidrocarburos presentes en las borras analizadas.

- Se caracterizó las propiedades del suelo antes del tratamiento como un suelo franco arcilloso arenoso, presentando una densidad de 2.23 g/ml, un pH de 6.33, una humedad de 3.9% y conductividad de 255 mV y posterior al proceso de biorremediacion como un suelo franco arenoso, con una densidad de 1.78 g/ml, un pH de 7, una humedad de 24% y una conductividad de 222 mV, valores que permiten un mejor desarrollo en siembra a nivel agrícola (Sanchez Ortiz & Velasquez Olarte, 2018).

- Se evaluaron los hidrocarburos totales de petróleos (TPH) presentes en las muestras a los tiempos 0, 22, 35, 50, 98, mostrando que las relaciones abono-suelo con mejor desempeño fueron las 1.5:1 y 2:1, mostrando que bajo condiciones de pH 6 las eras tienen una biorremediacion más rápida de aproximadamente 35 días que aquellas eras con pH 8 la cual su proceso de biorremediacion fue más lento.

- Se evidencio con base en la literatura encontrada la razón por la cual la era 11 tuvo un alto rendimiento de biorremediacion llamada cinética de degradación de contaminantes orgánicos presentes en los microorganismos del suelo y el abono Ceagrodex, fenómeno considerado por algunos autores como “palo de hockey”. También las cantidades de nitrógeno (N) y fosforo (P) presentes, junto con una relación C/N de 14.5 y carbono orgánico oxidable total de 27.7% en el abono Ceagrodex, tuvieron una importancia significativa para la biodegradación de la eras en el proyecto. Puesto que estos nutrientes son esenciales para un rendimiento de biodegradación exitoso. Se cree que junto con el carbono presente en la eras formaron relaciones C/N y C/P, relaciones las cuales son muy importantes para el desarrollo y nutrición microbiano.

- Se pudo verificar los tipos de microorganismo presentes y dominantes en las 16 eras del proyecto provenientes del abono Ceagrodex causantes del éxito de la biorremediacion, los microorganismos Mesófilos y Termófilos; los primeros porque estuvieron expuestos inicialmente a una temperatura entre 25 a 40 ^{o}C junto con una adecuado pH que varió entre 5.5 y 8 la cual es propicio para el crecimiento y desarrollo de estos microorganismo. Y los segundos porque se beneficiaron de la alta energía cinética de los primeros, cuestión por la cual elevo la temperatura de las eras superando los 40 ^{o}C, temperatura la cual comienzan a crecer estos microrganismo. Este comportamiento se puede corroborar con la alta eficiencia ocurrida en la era 11.

8. RECOMENDACIONES

- Con base en los resultados obtenidos, los cuales fueron exitosos, resultaría conveniente seguir con el experimento a nivel industrial, donde implemente cargas contaminantes de borras mayores a las propuestas en este proyecto y con un número de tiempo más largo.

- Repetir el presento proyecto bajo las mismas condiciones, pero modificando las concentraciones de la borras de hidrocarburo, con un suelos que tenga diferente propiedades físico-químicas (pH, textura, humedad, densidad y conductividad diferentes).

- Repetir el presente proyecto bajo las mismas condiciones, pero modificando la proporción del suelo, borras de hidrocarburos y abono Ceagrodex.

- También realizar a detalle pruebas que permitan verificar las relaciones C/N, C/P esenciales para el desarrollo y crecimiento microbiano y cómo influyen los demás nutrientes presentes en el abono Ceagrodex en los procesos de biorremediacion, como lo son el calcio, el potasio, el sodio, las cenizas.

- Realizar estudios experimentales en base a la presente tesis, afín de fortalecer el argumento, que el landfarming en el tratamiento bilógico de borras de hidrocarburos es una técnica deseable desde el punto de vista ecológico, en contraste a alternativas más costosas y de menor aceptación público.

9. BIBLIOGRAFÍA

(ATDSR), A. f. (1987). TOXICOLOGICAL PROFILE FOR. U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES.

Alexander, M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation.* New York, U.S.A: © Academic Press 1999.

Atlas, R. M. (1981). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental perspective. Kentuky: University of Louisville.

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.

BORRAS(OTS), S. T. (2018). *PERFORMARKET DRILLING SERVICES,S.* Retrieved from https://es.slideshare.net/PERFOMARKET/sistema-trifsico-de-separacin-de-borras

Boukir, A., Derwich, E., & Benziane, Z. (2009). Chemical compositions and insectisidal activity of essential oils of three plants Artemisia SP: Artemisia herba-alba, Artemisia absinthium and Artemisia Pontica (Morocco). EJEAFChe.

Canals, M. V. (2005). Biorremediacion de suelos contaminados por Hidrocarburos:caracterizacion microbiologica, quimica y ecotoxicologica. Barcelo, España: Universitat de Barcelona.

Casrrillo, J. R. (1998). Congreso Interamericano sobre el medio ambiente, Volumen 2, pagina 325/331. Bolivia: Universidad Simon Bolivar.

Crosara, A. (2012). *Edafologia.fcien.edu.* Retrieved from www.pr.nrcs.usda.gov, tomado de Crosara Alicia, textura del suelo, http://edafología.fcien.edu.uy/archivos/Practico%203.pdf

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 Tecnologica de Pereira.

DELGADO, K. T., & MONTOYA, T. Z. (2009). BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS. Medellin, Colombia: Universidad Nacional de Colombia sede Medellin.

Dorronsoro, C. (2010). *edafologia.net.* Obtenido de http://www.edafologia.net/introeda/tema01/perfil2.htm

FAO. (2001). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Europa: United Nations.

Gafonova, O., & Yarranton, H. (2001). The Stabilization of Water-in-Hydrocarbon Emulsions by Asphaltenes and Resins. Journal of Colloid and Interface Science.

Herrera Pinedo, B. (2014). INFLUENCIA DE LA AIREACION EN EL TRATAMIENTO BIOLOGICO DE BORRAS DE HIDROCARBUROS. Lima, Peru: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, LIMA- PERU.

Introduccion a los Biorreactores, Capitulo 8. (n.d.). Retrieved from http://www.criba.edu.ar/cinetica/reactores/CAPITULO%208.pdf

J., D. F. (2002). *Introduccion a la Ciencia del Suelo.* Medellin: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellin.

J.A, M., T, H., & C., G. (2005, Junio). Biorremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: influence on soyl microbial activity. Enveiromentla Research, Volume 98. España: Centro de Edafologia y Bilogia aplicada del Segura.

Jiménez, M., Guerrero-Peña, A., Zavala-Cruz, J., & Alarcón, A. (2011, Abril). EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS Y COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETROLEO EN. Villahermosa, Mexico: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Liu, W. (2009). Prepared bed bioremediation of oily sludge in an oilfield in northern China. china: Journal of Hazardous Materials.

MENDEZ, D. A., & TOVAR MUÑOZ, J. C. (2017). EVALUACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA PARA ÁREA DE LANDFARMING CONTAMINADA CON UN CRUDO PESADO, USANDO ABONO CEAGRODEX. Neiva-Huila, Colombia: Universidad Surcolombiana.

MISHRA, S., JYOT, J., C. KUHAD, R., & LAL, B. (2001, Febrero 1). Evaluation of Inoculum Addition To Stimulate In Situ Bioremediation of Oily-Sludge-Contaminated Soil. New Delhi, India: APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY.

Mrayyan, B., & N. Battikhi, M. (2004, Noviembre). Biodegradation of total organic carbons (TOC) in Jordanian petroleum sludge. Jordania: Journal of Hazardous Materials.

Ocampo, L. J., & Dominguez., M. P. (2015). METODOS UTILIZADOS PARA EL TRATAMIENTO DE LAS BORRAS DE. Cartagena, Colombia: Universidad de San Buenaventura Cartagena.

Pinedo, B. H. (2014). INFLUECIA DE LA AIREACION EN EL TRATAMIENTO BIOLOGICO DE BORRAS DE HIDROCAARBUROS. LIMA, PERU: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA LIMA-PERU.

R., H., T., H., & F., K. (2003, Mayo 30). Landfarming operation of oilysludge in arid region—human health risk assessment. Journal of Hazardous Materials, Volume 99. Arabia Saudita: Environmental Unit, R&D Center, Saudi Aramco,Dhahran, Saudi Arabia.

Rivera-Cruz, M. d., Trujillo-Narcía, A., Cruz, M. A., & Maldonado., E. (2005, junio). Evaluación toxicológica de suelos contaminados con petróleos nuevo e intemperizado mediante ensayos conleguminosas. Venezuela: Asociación Interciencia.

Romero, S. E., Gutierrez Bustos, D. C., Hernardez Marin, A. M., Hernandez Rodriguez, S. Z., Losada Casallas, M., & Mantilla Vargas, P. C. (2008). Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediacion por Pseudomonas en suelos contaminados por hidrocarburos. Cundinamarca, Colombia: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Rossini, F. D. (1960). Hydrocarbons in petroleum. Journal of chemical education.

Sanchez Ortiz, O., & Velasquez Olarte, M. A. (2018). EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA PARA ÁREA LANDFARMING CONTAMINADA CON UN CRUDO LIVIANO, USANDO ABONO 100% ORGÁNICO DE LA EMPRESA CEAGRODEX. Neiva-Huila, Colombia: Universidad Surcolombiana.

Speight, J. G. (1991). The chemistry and technology of petroleum, second edition, revised and expanded. New York: AlChE JOURNAL.

Toro, M. A., & Quirama., J. F. (2012). Biorremediacion en suelos Contaminados con Hidrocarburos en Colombia. Medellin, Colombia: UNAD.

Torres Cervera, K. P. (2014). ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR EL TRATAMIENTO Y DISPOSICION FINAL DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS (BORRAS) GENERADOS EN LOS DISTRITOS DE PRODUCCION DE HIDROCARBUROS. Bogota, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Vásquez, G. H. (2008). Tratamiento de fondo de tanques de petroleos usando el método de biorremdiación. Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.

Vicente, J., Carrasco, J., & Negro, M. (1996). EL COMPOSTAJE COMO TECNOLOGIA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS: COMPOSTAJE DE BAGAZO DE SORGO DULCE CON DIFERENTES FUENTES DE NITROGENO. Madrid, España: Centro de Investigaciones Energeticas, Medio ambientales y Tecnoilogicas, Ciudad Universiytaria.

Villalaz, C. C. (2004). *Mecanica de Suelos y Cementaciones 5 edicion.* Monterrey: Limusa S.A.

W., O., H., L., V., M., Y., Y., Z., X., & S., K. (2004, Diciembre). Comparison of bio-augmentation and composting for remediation of oilysludge: A fieldscale study in China, Volume 40. China: Process Biochemistry.

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 26. Tamizado del suelo

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 27.Gama colores del suelo.

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 18. *Clasificación porosidades del suelo*

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

Fuente: Autores

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 interface 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 19. *Valores pH de los suelos.*

Categoría	Valor de pH
Fuertemente acido	<5.0
Moderadamente acido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

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, Cruz, & Maldonado., 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. (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 liquida 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, 22, 35, 50 y 98 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.

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA BORRA A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO

La caracterización de la borra es la evaluación de la composición física y química de las materias componentes de este. Cada tipo de borra 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 borra es compatible con una refinería en particular y también permite que los proveedores, prevean y tomen decisiones comerciales adecuadas.

Una evaluación de borras 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.
- Frasco, caneca o bolsa

Procedimiento

- Recolectar con una pala o espátula una muestra representativa del suelo.
- Almacenarla en un frasco o bolsa limpia el cual pueda sellarse 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 30ºC, 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 cuadriculas demarcadas.
- Mezclar uniformemente las muestras de cada cuadricula para obtener una muestra representativa por cuadricula 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 pasa cada tamiz, hasta llegar al tamiz 200 que es aquel que define el límite entre finos y gruesos.

COLOR

Tabla 20.Colores la arcilla.

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

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

- Hue: Longitud de onda dominante.

- Value: Cantidad de luz, variando entre colores claros y oscuros.

- Chroma: Pureza relativa de la longitud de onda de luz.

Procedimiento:

- Determine el estado de humedad del suelo: Seco, húmedo o mojado y anótelo. El suelo al estar seco es compacto, duro, no se adhiere y no mancha los dedos; por el contrario al 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 fundamente 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:

$$(\%Pt)=1-(Da-Dr\ )\ 100$$

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.

% Humedad = (Wsh – Wss)* 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 vacio
- 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 5 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 vacio 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

Eras	TPH			
	t= 22 dias	**t=35 dias**	**t=50 dias**	**t=98 dias**
1	3	2	1.4	ND
2	5.6	5.4	2.6	0.4
3	9.6	6.6	5	ND
4	13	10.4	7.8	1.4
5	1.2	1	ND	ND
6	2.6	2.2	1.8	0.2
7	6	4.4	3.8	0.2
8	10.6	9.6	8	0.6
9	1.6	0.8	ND	ND
10	3.4	1.8	1	ND
11	2.2	0.8	0	ND
12	9	7	4.4	ND
13	1.6	0.8	ND	ND
14	2	1	ND	ND
15	3.2	2.2	1.8	ND
16	4.2	3.8	3.4	ND