



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 17 de junio 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

Los suscritos:

María Cristina Castillo Londoño, con C.C. No. 1116273803,

Jhonny Javier Martínez Carvajal, con C.C. No.1234638265,

Autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado “ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TPH (HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO), UTILIZANDO GODOIL COMO AGENTE BIORREMIADOR APLICADO EN RESIDUOS ACEITOSOS GENERADOS EN TANQUES DE CRUDO (BORRAS) A CONDICIONES DE LABORATORIO” presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero/a de Petróleos;

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

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

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

Vigilada Mineducación

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



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

MARÍA CRISTINA CASTILLO LONDOÑO:

JHONNY JAVIER MARTÍNEZ CARVAJAL:

Firma: _____

Firma: _____

Vigilada Mineducación

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

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA						
	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO							
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Análisis del porcentaje de remoción de tph (hidrocarburos totales de petróleo), utilizando godoil como agente biorremediador aplicado en residuos aceitosos generados en tanques de crudo (borras) a condiciones de laboratorio.

AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Castillo Londoño	María Cristina
Martínez Carvajal	Jhonny Javier

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 M.	Haydeé
Marrugo Escobar	Gloria Patricia

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero de Petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Petróleos

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 91

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías X Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general X Grabados___
 Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
 o Cuadros X

Vigilada Mineducación

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

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

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

MATERIAL ANEXO: NO

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

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Producto orgánico	Organic product
2. Agente biorremediador	Biorremediator agent
3. Método gravimétrico modificado	Modified gravimetric method
4. Suelos contaminados	Contaminated floors
5. Carga contaminante	Polluting load

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En el presente proyecto se realiza el análisis y evaluación de la eficiencia del producto orgánico GODOIL, como agente biorremediador de suelos contaminados con borras. Para esto, se realiza el montaje de varias muestras a diferentes condiciones de TPH y relaciones de producto, todo bajo condiciones de laboratorio.

Para la evaluación de la eficiencia del producto, se realiza seguimiento del porcentaje de TPH a las diferentes muestras, mediante la prueba “método gravimétrico modificado (extracción con solvente)”. Las pruebas son realizadas en tres ocasiones; la primera se lleva acabo a los 19 días, para el día 33 se realiza la segunda prueba, en este caso el grupo de menor TPH inicial llega a las condiciones deseadas, las cuales son establecidas por el API, sin embargo, los demás grupos de muestras con valores de TPH inicial más elevado no llegan a los valores deseados, como si ocurre en la última prueba al día 48, donde se consigue que todas las muestras de diferentes TPH iniciales lleguen a valores de TPH menores a los permisibles por el API.

Finalmente, con los resultados obtenidos por las pruebas y con un análisis grafico de estos, se evidencia que el porcentaje de remoción de hidrocarburos en suelos



contaminados con borras es optimista, siendo este superior a un 99%. Además de ello, se obtuvo que el lapso de tiempo para que ocurra este proceso es mínimo y oscila entre 25 y 48 días dependiendo de la carga contaminante inicial y la relación de producto añadido.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

In the project, the analysis and evaluation of the efficiency of the organic product GODOIL is carried out, as a bio remediating agent for soils contaminated with borras. For this, several samples are assembled at different TPH conditions and product ratios, all under laboratory conditions.

For the evaluation of the efficiency of the product, the percentage of TPH is monitored in the different samples, by means of the "modified gravimetric method (solvent extraction)" test. The tests are performed three times; the first one takes place after 19 days, for the 33rd day the second test is performed, in this case the group with the lowest initial TPH reaches the desired conditions, which are established by the API, however, the other groups of samples with values of higher initial TPH do not reach the desired values, as it does in the last test at day 48, where all the samples of different initial TPHs reach lower TPH values than those allowed by the API.

Finally, with the results obtained by the tests and with a graphic analysis, it is evident that the percentage of hydrocarbon removal in contaminated soils, is optimistic, being higher than 99%. In addition, it was obtained that the time lapse for this process to occur is minimal and ranges between 25 and 48 days depending on the initial contaminant load and the ratio of product added.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Constanza Vargas Castellanos

Firma:

Constanza Vargas Castellanos

Nombre Jurado: Haydeé Morales M.

Firma:

Haydeé Morales

Nombre Jurado: Gloria Patricia Marrugo Escobar

Firma:

Gloria Patricia Marrugo E.

**ANALISIS DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TPH (HIDROCARBUROS
TOTALES DE PETRÓLEO), UTILIZANDO GODOIL COMO AGENTE
BIORREMEDIADOR APLICADO EN RESIDUOS ACEITOSOS GENERADOS EN
TANQUES DE CRUDO (BORRAS) A CONDICIONES DE LABORATORIO.**

**MARÍA CRISTINA CASTILLO LONDOÑO
JHONNY JAVIER MARTINEZ CARVAJAL**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA, HUILA
2019**

**ANALISIS DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TPH (HIDROCARBUROS
TOTALES DE PETRÓLEO), UTILIZANDO GODOIL COMO AGENTE
BIORREMEDIADOR APLICADO EN RESIDUOS ACEITOSOS GENERADOS EN
TANQUES DE CRUDO (BORRAS) A CONDICIONES DE LABORATORIO.**

**MARÍA CRISTINA CASTILLO LONDOÑO
JHONNY JAVIER MARTINEZ CARVAJAL**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero
de petróleos**

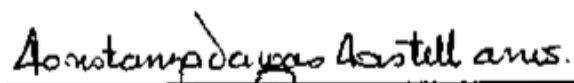
**Director
Msc. CONSTANZA VARGAS CASTELLANOS
INGENIERA DE PETROLEOS**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA, HUILA
2019**

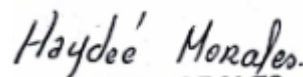
**ANALISIS DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TPH (HIDROCARBUROS
TOTALES DE PETRÓLEO), UTILIZANDO GODOIL COMO AGENTE
BIORREMEDIADOR APLICADO EN RESIDUOS ACEITOSOS GENERADOS EN
TANQUES DE CRUDO (BORRAS) A CONDICIONES DE LABORATORIO.**

ÁREA DE INVESTIGACIÓN: BIORREMEDIACIÓN

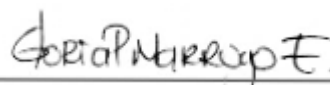
**PRESENTADO AL COMITÉ DE PROYECTOS DE GRADO DEL PROGRAMA DE
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**



Msc. Constanza Vargas Castellanos



Ing. Haydeé Morales M.



Ing. Gloria Patricia Marrugo E.

Neiva, junio de 2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado a Dios, a mis padres Carlos Alberto Castillo y María Orlanda Londoño, porque durante todo el proceso me han brindado apoyo y amor incondicional, a mi segundo padre Luis Abel Castillo, a mis abuelos María Adela Marín (QEPD), José Olmey Londoño (QEPD) y Luz Mila Castillo, a mi hermano Carlos Mauricio Castillo y a mi compañero de tesis Jhonny Javier Martínez.

María Cristina Castillo Londoño

Dedicado a Dios primero que todo por permitirme culminar una etapa más de mi vida, en compañía de mis seres queridos. A mi padre Javier Martínez, a mi madre Gloria Esperanza Carvajal y abuela materna Ana Cecilia García por su dedicación, amor y apoyo incondicional, y por último a mi compañera de tesis María Cristina Castillo por hacer de este trabajo y muchos momentos algo ameno y agradable.

Jhonny Javier Martínez Carvajal

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos nuestros formadores, personas de gran de sabiduría quienes se esforzaron por ayudarnos a llegar al punto en el que estamos. A nuestra directora de tesis Msc. Constanza Vargas Castellano por apoyarnos y guiarnos en este proyecto, y, además, aconsejarnos para crecer como personas. Por último, a la Universidad Surcolombiana y a todos nuestros compañeros de carrera.

CONTENIDO

Pág.

JUSTIFICACIÓN.....	14
OBJETIVOS.....	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos.....	15
1. INTRODUCCIÓN	16
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 SUELOS	17
2.1.1 Composición del suelo	17
2.1.2 Fracción mineral.....	18
2.1.3 Materia orgánica.....	18
2.1.4 Humedad.....	19
2.1.5 pH.....	19
2.2 BORRAS.....	20
2.2.1 Tipos de borras	20
2.3 TRATAMIENTO DE LAS BORRAS	21
2.3.1 Métodos de recuperación de borras.....	22
2.3.1.1 Método de tratamientos térmicos.....	22
2.3.1.2 Métodos químicos.....	22
2.3.2 Métodos de disposición final de las borras.....	23
2.3.2.1 Incineración	23
2.4 BIORREMEDIACIÓN.....	23
2.4.1 Antecedentes históricos de la biorremediación	25
2.4.2 Fundamentación bioquímica de la biodegradación	25
2.4.3 Factores que condicionan la biorremediación de un suelo.....	26
2.4.3.1 Factores medio ambientales.....	26
2.4.3.2 Factores microbiológicos	28
2.4.4 Microorganismos en la biorremediación	28

2.4.5	Ventajas y desventajas de la biorremediación	29
2.5	GRUPO EMPRESARIAL SOLANCO.....	29
2.5.1	GODOIL	30
2.5.2	Alcances del GODOIL	30
2.5.3	Antecedentes GODOIL	30
2.6	CEAGRODEX.....	31
2.6.1	Beneficios.....	31
2.6.2	Antecedentes	31
2.7	HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO (TPH).....	32
2.8	LEGISLACIÓN AMBIENTAL.....	32
3.	MARCO EXPERIMENTAL	34
3.1	OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN	34
3.1.1	Suelo	34
3.1.1.1	Obtención	34
3.1.1.2	Caracterización.....	34
3.1.2	Borra	35
3.1.2.1	Obtención	35
3.1.2.2	Caracterización.....	35
3.1.3	GODOIL	36
3.1.3.1	Obtención	36
3.1.3.2	Caracterización.....	36
3.1.4	Abono CEAGRODÉX	37
3.1.4.1	Obtención	37
3.1.4.2	Caracterización.....	37
3.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	39
3.3	MEDICIÓN DE TPH.....	46
4.	RESULTADOS	50
5.	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES.....	60
	BIBLIOGRAFÍA.....	61

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Composición del crudo.....	20
Tabla 2. Clasificación de los crudos se acuerdo a su gravedad °API	21
Tabla 3. Caracterización del suelo.....	35
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de la borra	36
Tabla 5. Composición Química GODOIL	36
Tabla 6. Especificaciones Fisicoquímicas GODOIL.....	37
Tabla 7. Generalidades del abono CEAGRODEX	38
Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas del abono CEAGRODEX.....	38
Tabla 9. Microorganismos presentes en abono de CEAGRODEX	39
Tabla 10. Composición ERAS diferentes TPH.....	41
Tabla 11. Densidad del producto	42
Tabla 12. Relación suelo, borra y producto de cada ERA	43
Tabla 13. Resultados porcentaje de TPH	50
Tabla 14. Aporte de nutrientes al suelo	58
Tabla 15. Relación color - propiedades del suelo	64
Tabla 16. Clasificación de suelos según su CE, pH y sodio intercambiable	67
Tabla 17. Resultados prueba gravedad °API y gravedad especifica	73
Tabla 18. Lecturas tabla #5 ASTM.....	73
Tabla 19. Resultados prueba BSW.....	76
Tabla 20. Resultados Prueba Viscosidad SSF	78
Tabla 21. Densidad de aceite a Tx	79
Tabla 22. Viscosidades Reales.....	79
Tabla 23. Composición del blanco de reactivos.....	81
Tabla 24. Composición de la muestra de la borra.....	81
Tabla 25. Resultados de las lecturas realizadas.....	81
Tabla 26. Resultado de la prueba de salinidad de la borra.....	81

LISTA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Procesos de biodegradación	26
Ilustración 2. Ubicación finca “La Bonita”	34
Ilustración 3. Adición de suelo a la muestra.....	44
Ilustración 4. Adición de borra en el suelo dispuesto a contaminar	44
Ilustración 5. Montaje final de ERAS.....	45
Ilustración 6. Mezcla de Suelo, agua y cloroformo.....	46
Ilustración 7. Embudo de decantación – Separación de fases.	47
Ilustración 8. Resultado decantación – Crudo y cloroformo.....	47
Ilustración 9. Decantación final	48
Ilustración 10. Baño de maría para evaporar el cloroformo	48
Ilustración 11. Carta Munsell.....	65
Ilustración 12. Muestras de tierra en Carta Munsell.....	66
Ilustración 13. Conductímetro y potenciómetro.....	68
Ilustración 14. Ficha técnica GODOIL.....	84
Ilustración 15. Ficha técnica abono orgánico empresa CEAGRODEX	85
Ilustración 16. Ficha de seguridad TOLUENO	86
Ilustración 17. Ficha de seguridad XILENO	88
Ilustración 18. Ficha de seguridad CLOROFORMO	90

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. TPH INICIAL 9% (%TPH VS TIEMPO)	54
Gráfica 2. TPH INICIAL 18% (%TPH VS TIEMPO)	54
Gráfica 3. TPH INICIAL 36% (%TPH VS TIEMPO)	55
Gráfica 4. TPH INICIAL 45% (%TPH VS TIEMPO)	55

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A.....	64
ANEXO B.....	72
ANEXO C.....	82
ANEXO D.....	84
ANEXO E.....	86

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

°API	Medida de densidad que, en comparación con el agua a temperaturas iguales, precisa cuán pesado o liviano es el petróleo
BSW	Contenido de agua y sedimentos en hidrocarburos líquidos
PTAR	Plantas de tratamiento de aguas residuales
PTB	Libras por mil barriles
TPH	Hidrocarburos totales de petróleo

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el análisis y evaluación de la eficiencia del producto orgánico GODOIL, como agente biorremediador de suelos contaminados con residuos aceitosos de tanques de almacenamiento de crudo (borras). Para esto, se realiza el montaje de varias muestras a diferentes condiciones de TPH y relaciones de producto, todo bajo condiciones de laboratorio; los parámetros como pH y humedad que influyen directamente en este tipo de pruebas son controlados durante todo el tiempo.

Para la evaluación de la eficiencia del producto, se realiza seguimiento del porcentaje de TPH a las diferentes muestras, mediante la prueba “método gravimétrico modificado (extracción con solvente)”. Las pruebas son realizadas en tres ocasiones; la primera se lleva a cabo a los 19 días de montadas las muestras, en esta ocasión no se obtienen los resultados deseados. Para el día 33 se realiza la segunda prueba, en este caso el grupo de menor TPH inicial (TPH = 9%) llega a las condiciones deseadas, las cuales son establecidas por el API (TPH < 1%), sin embargo, los demás grupos de muestras con valores de TPH inicial más elevados no llegan a los valores deseados, como si ocurre en la última prueba al día 48, donde se consigue que todas las muestras de diferentes TPH iniciales lleguen a valores de TPH menores a los permisibles por el API.

Finalmente, con los resultados obtenidos por las pruebas y con un análisis gráfico de estos, se evidencia que el porcentaje de remoción de hidrocarburos en suelos contaminados con borras utilizando GODOIL como agente biorremediador, es optimista, siendo este superior a un 99%. Además de ello, se obtuvo que el lapso de tiempo para que ocurra este proceso es mínimo y oscila entre 25 y 48 días dependiendo de la carga contaminante inicial y la relación de producto añadido.

JUSTIFICACIÓN

En la industria petrolera los residuos aceitosos (borras) se generan en los tanques de almacenamiento y tuberías de producción con el paso del tiempo por la sedimentación y aglomeración de sólidos (rocas, arenas, lodos de perforación, entre otros), hidrocarburos, y emulsión del agua en aceite. Estos residuos presentan grados API muy bajos, formando masas densas y viscosas, lo cual presenta una problemática para la industria, ya que son difíciles de remover, no son aprovechables por su composición, causan atascamientos y mal funcionamiento de las facilidades de superficie, además, representan problemas por su disposición al medio. Para esta problemática se plantea utilizar un producto vegetal desarrollado por la empresa SOLANCO S.A (GODOIL) que ha sido implementado en suelos y fuentes hídricas contaminadas por crudo, pero hasta el momento no se conoce la aplicación de este producto en borras; lo cual puede ser una solución amigable con el medio ambiente para la disposición y manejo de estos residuos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el porcentaje de remoción de TPH de los residuos aceitosos (borras), empleando GODOIL como biorremediador a condiciones de laboratorio.

Objetivos específicos

- Identificar la concentración óptima de GODOIL para evidenciar la remediación de borras con base en la cantidad de hidrocarburo presente en residuos generados en tanques de crudo.
- Evaluar remoción de TPH en las muestras de borras, tratadas con GODOIL bajo condiciones de pH y humedad controladas.

1. INTRODUCCIÓN

Las borras son residuos que se forman después de largos periodos de tiempo en los tanques y tuberías de la industria del petróleo por sedimentación y aglomeración de compuestos de hidrocarburos de cadenas largas. Estos residuos generados a partir de actividades minero – energéticas constituyen un tema ambiental de especial importancia, ya que son considerados como fuentes de riesgo para el medio ambiente y la salud. Por lo anterior, su disposición final representa una preocupación y/o reto importante en materia de cumplimientos de los lineamientos de regulación ambiental para la industria petrolera.

El método de disposición final de borras más amigable con el medio ambiente es la biorremediación, proceso por el cual los microorganismos realizan la descomposición de las cadenas complejas del hidrocarburo naturalmente. En este proceso se debe tener en cuenta parámetros del suelo como pH, humedad y temperatura para la supervivencia de los microorganismos, además, de los nutrientes requeridos por estos.

En este proyecto se presenta la aplicación de un producto 100% orgánico (GODOIL) en muestras de suelo previamente contaminadas con borras a condiciones de laboratorio (humedad, temperatura y pH controlados) para generar un proceso de biorremediación, y así, evidenciar la efectividad y concentración óptima del producto como alimento de los microorganismos para la remoción de hidrocarburos en este tipo de residuos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 SUELOS

Se denomina suelo al sistema estructurado, biológicamente activo, que tiende a desarrollarse en la superficie de las tierras emergidas por la influencia de la intemperie y de los seres vivos. Se trata de un sistema formado por componentes minerales, componentes orgánicos (humus y derivados, biomasa viva y muerta), gas (aire en el espacio existente en los poros), y agua envolviendo partículas y el espacio capilar. Existe una gran variedad de microorganismos (bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoos) que casi siempre están presentes en ellos, aunque las densidades de población de estas varían ampliamente. (Torres & Zuluaga, 2009)

Las propiedades físicas y químicas de los suelos influyen en gran manera sobre la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la retención de agua y, por lo tanto, en la actividad biológica (INTAGRI, 2017). Las propiedades más importantes de las que engloban estos grupos son el tamaño de partícula, la porosidad, la humedad, estado de aireación, composición química, fracción de arcilla, capacidad de intercambio de cationes y fracción orgánica. El tamaño de partícula afecta a la química de la superficie de los suelos y al tamaño de los poros. La cantidad de poros depende de la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo (Ramírez, 1997).

2.1.1 Composición del suelo

La matriz de un suelo está compuesta por cinco componentes principales: (Castillo, 2009)

- **Minerales.** Los materiales minerales constituyen los principales componentes estructurales de los suelos y suponen más del 50% del volumen total.
- **Aire – agua.** Conjuntamente constituyen el volumen poroso, 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, con valor medio.

2.1.2 Fracción mineral

El mineral predominante en un suelo es el dióxido de silicio (SiO_2). La composición química varía de un suelo a otro y, en un mismo suelo, a diferentes profundidades. Los microorganismos obtienen parte de los nutrientes que necesitan de la fracción mineral del suelo, siendo dichos nutrientes nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, azufre, hierro, calcio, manganeso, zinc, cobre y molibdeno. Sin embargo, los microorganismos pueden disponer con facilidad únicamente de una pequeña parte de estos minerales, convirtiéndolos más en una provisión de lento empleo, que en una fuente de rápido uso. (Martin, 1991)

Los suelos se clasifican según el tamaño de sus partículas teniendo en cuenta tres componentes principales:

- Arcilla. Pasa por un tamiz de 0,002 mm.
- Limo. Queda retenido en el tamiz de 0,002 mm, pero pasa a través del tamiz de 0,05 mm.
- Arena. Queda retenida en el tamiz de 0,05 mm, aunque pasa a través del de 2mm.

La presencia en un suelo de superficies que absorban con gran intensidad determinadas clases de compuestos puede reducir la disponibilidad de compuestos orgánicos para la biodegradabilidad. También afecta la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de intercambio de cationes en el suelo de los minerales arcillosos y los compuestos orgánicos que constan de zonas con carga eléctrica superficial negativa.

2.1.3 Materia orgánica

La fracción orgánica del suelo está compuesta por: Residuos de plantas y animales. Células microbianas y productos resultantes del metabolismo microbiano, comúnmente llamado humus. (Martin, 1991)

2.1.4 Humedad

Para darse una idea general de la importancia que tiene el agua para el suelo es necesario resaltar que, junto con sus sales disueltas, forma la llamada solución del suelo; ésta es esencial para abastecer de nutrimentos a las plantas que en él se desarrollan.

La humedad del suelo influye significativamente en la actividad biológica, puesto que un suministro adecuado de agua es esencial para el crecimiento y la estabilidad microbiana. El agua es esencial para los procesos biológicos porque no solo provee un medio de transporte para los químicos que suministran energía y nutrientes a los microorganismos, sino también para que los procesos metabólicos continúen. (Razo, 2003)

2.1.5 pH

El pH mide la actividad de los H^+ libres en la solución del suelo (acidez actual) y de los H^+ fijados sobre el complejo de cambio (acidez potencial). La acidez total del suelo es la suma de las dos, porque cuando se produce la neutralización de los H^+ libres se van liberando H^+ retenidos, que van pasando a la solución del suelo.

El pH puede variar desde 0 a 14 y de acuerdo con esta escala los suelos se clasifican en:

- Suelos ácidos pH inferior a 6,5
- Suelos neutros pH entre 6,6 y 7,5
- Suelos básicos pH superior a 7,5

Un suelo con fuerte acidez es pobre en bases (calcio, magnesio, potasio), la actividad de los microorganismos se reduce y el fósforo disponible disminuye, al precipitarse con el hierro y el aluminio. Los micronutrientes, excepto el molibdeno, se absorben mejor en este tipo de suelos. Un suelo con fuerte basicidad presenta un alto contenido de bases de cambio, pero la presencia de un elevado contenido de carbonato de calcio bloquea la posible absorción de fósforo y de la mayor parte de los micronutrientes. La neutralidad en su sentido más amplio ($6,6 \leq pH \leq 7,5$) es

una condición adecuada para la asimilación de los nutrientes y para el desarrollo de las plantas (Tecnicoagrícola, 2013).

2.2 BORRAS

Las borras son residuos aceitosos que se forman después de largos periodos de tiempo en los tanques y tuberías de la industria del petróleo, por sedimentación y aglomeración de compuestos hidrocarbonados, especialmente de cadenas más largas, presentes en el crudo; sedimento y agua (Súarez, 2011). Los hidrocarburos pueden ser parafinas, asfáltenos, resinas y los sedimentos pueden ser residuos metálicos causados por oxidación de las tuberías o los tanques mismos, materiales inorgánicos, arenas, partículas finas y residuos metálicos de diferente índole (Vidales, 2008). Como consecuencia de las aglomeraciones de los hidrocarburos, la emulsión del agua en el crudo y la retención de sedimentos en aquella; los grados API disminuyen, alcanzando valores incluso inferiores a 10 °API, formándose masas densas y viscosas, difíciles de bombear, que se depositan en el fondo de los tanques, reduciendo su capacidad, o generan taponamientos en las tuberías (Súarez, 2011).

2.2.1 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 Nacional De Minería, Petróleo Y Energía, establece que la composición de un crudo es: (Gómez & Gómez, 2015)

Tabla 1. Composición del crudo

Elemento	%
C	83 – 87%
H	11 – 14 %
O	0 – 5 %
S	0 – 6%
N	0 – 0.5%
C. Inorgánicos	0 – 0.1%

Fuente: (Gómez & Gómez, 2015)

De acuerdo con esto el crudo se puede clasificar según su composición en:

- Parafínicos: sus compuestos principales son hidrocarburos saturados de bajo peso molecular, lo que permite que sean crudos muy fluidos. Están por encima de los 31° API.
- Nafténicos: sus compuestos principales son naftenos e hidrocarburos aromáticos. Están entre los 10 y los 22° API, siendo muy viscosos y de coloración oscura.
- Mixtos: están formados por toda clase de hidrocarburos: parafinas, naftenos, hidrocarburos saturados, insaturados y aromáticos, entre otros, encontrándose con gravedades API entre los 22° y los 31°.
- Dulce: su contenido de azufre es menor de 0,5%.
- Agrio: su contenido de azufre es mayor que 1%.

Los crudos también pueden ser clasificados por su gravedad API. De acuerdo con los grados API el crudo se puede clasificar como se muestra en la siguiente tabla, el cual fue tomado de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (Gómez & Gómez, 2015):

Tabla 2. Clasificación de los crudos se acuerdo a su gravedad °API

°API	Tipo de crudo
>31,1	Liviano
22,3 -31,1	Medio
10 – 22,3	Pesado
< 10	Extrapesado

Fuente: (Gómez & Gómez, 2015)

2.3 TRATAMIENTO DE LAS BORRAS

En Colombia en la gran mayoría de los casos, no se hace recuperación de borras, sino disposición final, y específicamente, biorremediación. A continuación, se hará mención tanto de las técnicas usadas para recuperación de borras como de las correspondientes a disposición final.

2.3.1 Métodos de recuperación de borras

En los métodos de recuperación, el objetivo es realizar un proceso de separación del hidrocarburo presente en la borra, para finalmente ser reutilizado o en tal caso reinyectado en las tuberías de producción. Los dos métodos más utilizados son por tratamiento térmico y químico, como se explica a continuación.

2.3.1.1 Método de tratamientos térmicos

Un método reconocido para recuperación de crudo de las borras corresponde al uso de tratamientos térmicos para romper las cadenas hidrocarbonadas más largas, de manera que se obtenga un crudo con mejores características en términos de °API y menor viscosidad, lo que permite la separación de contaminantes, como es el caso del tratamiento térmico desarrollado por Petrobras.

El sistema de Petrobras consiste en una serie de procesos en que los residuos son sometidos a temperaturas hasta de 700°C. Se consigue recuperar hasta el 99% del petróleo existente, en un proceso de ciclo cerrado; las altas temperaturas aseguran además del rompimiento de cadenas, que la fracción sólida restante quede exenta en un 100% de hidrocarburos, siendo transformada en un elemento inerte que puede ser descartado sin perjuicios para el ambiente. Este tratamiento piloto, tiene en este momento una capacidad para procesar 500 kilos de borra de petróleo por hora y está montado dentro de un gran cilindro y sobre un camión para ser transportado hasta los diferentes pozos (Petrobras, 2017).

2.3.1.2 Métodos químicos

En algunos casos se hace uso de disolventes de baja densidad que simplemente diluyen la borra, aumentando los grados API hasta llegar a cumplir con las especificaciones necesarias para reinyectar en tubería; en otros casos se usan rompedores de aglomeraciones que reducen la viscosidad de la borra. En ninguno de los dos casos los tratamientos hacen remoción de contaminantes como arena, arcilla, sedimentos o agua, por lo que, al inyectar nuevamente las borras tratadas en las líneas de producción, pueden generar taponamientos en las tuberías. (Gómez & Gómez, 2015)

2.3.2 Métodos de disposición final de las borras

Los métodos de disposición final de las borras más utilizados en la industria son la biorremediación y la incineración, siendo el primero el más amigable con el medio ambiente como se describe más adelante. A continuación, se explica la disposición por incineración.

2.3.2.1 Incineración

La incineración es el método de tratamiento de los residuos más antiguo; tiene como principio la combustión controlada de los residuos, transformándolos en materiales no combustibles, inodoros, homogéneos e inertes. La incineración consiste en la oxidación exotérmica rápida de los compuestos combustibles. A través de este método se reduce el volumen de los residuos, pero se generan emisiones; los costos de capital, operación y mantenimiento son altos; requiere personal de operación calificado y requiere control de emisiones gaseosas. Las temperaturas que se manejan en los incineradores pueden estar cercanas a los 800°C. Es necesaria la inyección de oxígeno para combustión completa, para lo cual es necesario realizar análisis elementales de la composición, para estimar los requerimientos teóricos del aire y oxígeno. Dentro de los incineradores, el más usado, es el incinerador de pisos múltiple, por ser durable, de operación simple, y puede manejar cargas de cantidad y calidad variables. Otro tipo de incinerador común es el de lecho fluidizado que es un depósito vertical cilíndrico de acero revestido con material refractario, que contiene un lecho de arena y orificios para alimentar aire para la producción y mantenimiento de combustión continua (Romero, 2004).

2.4 BIORREMEDIACIÓN

La práctica de biorremediación consiste en el uso de microorganismos como hongos, levaduras, bacterias naturales o modificadas genéticamente para neutralizar sustancias tóxicas en sustancias menos tóxicas o convirtiéndolas en inocuas para el ambiente y la salud humana (Benavides, 2006). La característica más importante de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que por actividad microbiana se pueden transformar en compuestos diferentes.

Los microorganismos transforman y metabolizan aeróbicamente los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono, agua y fuentes de alimento para sustentar su crecimiento y reproducción, es decir, la biodegradación ocurre naturalmente. La conversión completa del carbono orgánico a carbono inorgánico (en la forma dióxido de carbono) se define como biomineralización. Si la reacción es incompleta y produce algunos compuestos secundarios, el proceso se dice que es una biotransformación. (Razo, 2003)

Es conocido que los microorganismos indígenas tienen la capacidad de adaptarse y eventualmente degradar cualquier compuesto orgánico natural sin asistencia del hombre; sin embargo, esta adaptación requiere la presencia de condiciones ambientales apropiadas tales como el pH, temperatura, el aceptor final de electrones (que en procesos aeróbicos es el oxígeno), concentraciones de contaminante no tóxicas para los microorganismos y adecuadas condiciones de humedad y conductividad del medio, entre las más importantes. La ausencia de alguna o varias de las anteriores condiciones puede limitar parcial o totalmente la actividad biológica y es cuando la mano del hombre juega un papel fundamental en la optimización del proceso, ya sea mejorando estas condiciones para aumentar la población de microorganismos (bioaumentación) y/o manipulando genéticamente los microorganismos para la degradación específica de algunos compuestos químicos (Torres & Zuluaga, 2009).

La adición de surfactantes puede ayudar a el aumento de solubilidad de los hidrocarburos en la fase acuosa y a la biodisponibilidad, siendo este uno de los parámetros principales que influyen en el alcance de la biodegradación. El efecto más importante del surfactante entre el suelo y el contaminante es la estimulación del transporte de masa del contaminante desde el suelo hasta la fase acuosa, donde se puede dar la biodisponibilidad, la cual está influenciada por; las interacciones de surfactante-células, interacciones células-contaminante e interacciones de superficie de contaminantes, esto va relacionado con tres mecanismos; la emulsión de contaminantes líquidos, solubilización micelar y la facilidad de transporte. Un contaminante adsorbido puede facilitar el transporte en el suelo, siendo este el efecto más importante de los surfactantes en biorremediación, por lo tanto, la reducción de la tensión interfacial y de superficie son probablemente los mejores parámetros para la selección del surfactante en la remediación biológica del suelo (Riojas, 2010).

2.4.1 Antecedentes históricos de la biorremediación

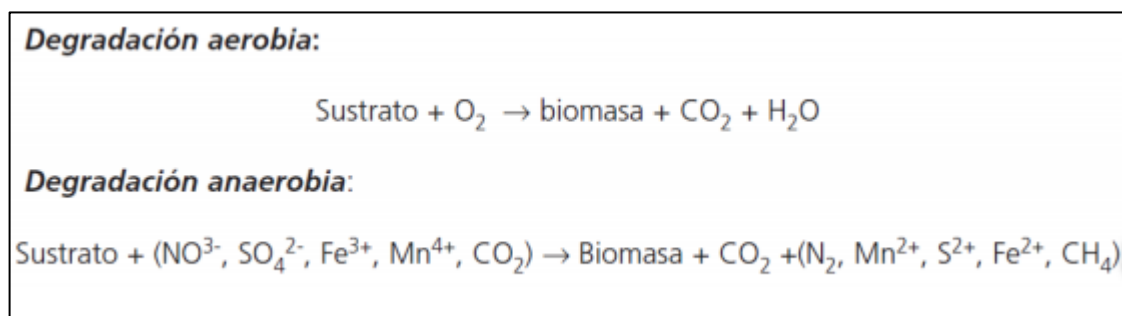
A mediados del siglo XX se desarrollaron las primeras investigaciones encaminadas a estudiar el potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes. Este "uso" intencionado recibió entonces el nombre de biorremediación ("bioremediation"). Las primeras técnicas que se aplicaron fueron similares al "landfarming" (labranza) actual y sus actores, lógicamente, compañías petrolíferas. Las primeras patentes, fundamentalmente para remediación de vertidos de gasolina, aparecen en los años 70. En los años 80 se generalizó el uso del aire y peróxidos para suministrar oxígeno a las zonas contaminadas mejorando la eficiencia de los procesos degradativos. Durante los años 90 el desarrollo de las técnicas de "air sparging" (burbujeo de oxígeno) hizo posible la biorremediación en zonas por debajo del nivel freático. Al mismo tiempo, la implementación en la práctica de aproximaciones experimentales en el laboratorio permitió el tratamiento de hidrocarburos clorados, los primeros intentos con metales pesados, el trabajo en ambientes anaerobios, etc. Paralelamente, se desarrollaron métodos de ingeniería que mejoraron los rendimientos de las técnicas más populares para suelos contaminados ("landfarming", "composting", etc.) (Gómez & Gómez, 2015).

2.4.2 Fundamentación bioquímica de la biodegradación

El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa, principalmente, en la serie de reacciones de óxido – reducción catalizada por enzimas. Las enzimas involucradas en la degradación son la oxigenasa, la deshidrogenasa y las enzimas lignolíticas. Estas son extracelulares y catalizan la formación de radicales por oxidación para desestabilizar los enlaces en la molécula. (Haritash & Kaushik, 2009). Las enzimas capturan segmentos o átomos de carbono individuales de moléculas contaminantes orgánicas para usarlas como fuente de carbono para la respiración (producción de energía) y para construir nuevas células (producción de biomasa). Otro requerimiento de los microorganismos para construir células son los macronutrientes, principalmente las formas propias de nitrógeno y fósforo, desde que estos son los principales componentes de todas las células. Estos nutrientes, en algunos casos, deben de ser añadidos a la matriz (suelo o agua) para que crezca la población microbiana y pueda ocurrir una biorremediación adecuada. Otros elementos que pueden ser requeridos en algunas concentraciones son azufre, potasio, sodio y otros metales como cobre, magnesio, zinc y hierro.

Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. La biodegradación ha sido observada en condiciones tanto aeróbicas como anaeróbicas y la tasa puede mejorarse mediante el tratamiento físico / químico del suelo contaminado (Haritash & Kaushik, 2009). Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio. (Ilustración 1)

Ilustración 1. Procesos de biodegradación



Fuente: (Súarez, 2011)

2.4.3 Factores que condicionan la biorremediación de un suelo

La biorremediación de un suelo contaminado depende de diversos factores, los más relevantes pueden clasificarse en dos grupos:

2.4.3.1 Factores medio ambientales

Los microorganismos son muy sensibles a los cambios de temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes, oxígeno y humedad.

- El pH. Afecta significativamente la actividad microbiana. En consecuencia, cuanto mayor sea la diversidad de microorganismos existentes, potencialmente mayor será el rango de tolerancia. No existen unas condiciones preestablecidas que sean óptimas en todos los casos, pero en términos generales el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos

es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8. En general, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutro (pH 6 - 8), mientras que es más ácido para los hongos (pH 4 - 5). El pH óptimo establecido para procesos de biodegradación es neutro (pH 7,4 - 7,8) (Dible & Bartha, 1979).

Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.

- Temperatura. Es uno de los factores ambientales más importantes que afecta la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación. Generalmente, las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 20 y 30 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C (Maroto & Rogel, 2002).
- Humedad. Los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo (el rango varía en función de la técnica) (Maroto & Rogel, 2002).
- Oxígeno. Es el aceptor final de electrones generalmente empleado en procesos biológicos y también es necesario en determinados tipos de reacciones de oxidación – reducción catalizada por enzimas. Los microorganismos, oxidan compuestos orgánicos o inorgánicos, obteniendo así la energía necesaria para su crecimiento. El proceso de oxidación da lugar a electrones que intervienen una cadena de reacciones en el interior de la célula y, al final, deben ser vertidos en el entorno. El aceptor final de electrones es el receptor de estos y, en el caso de un metabolismo aerobio, O_2 es el aceptor y H_2O es el producto. 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), ya que en ausencia de O_2 , y en presencia de aceptores de electrones alternativos (NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_2 , Mn^{4+} y Fe^{3+}) los hidrocarburos pueden ser degradados, pero

con unas tasas de biodegradación muy inferiores a las aeróbicas (Sánchez & Sanabria, 2009).

- Necesidad de nutrientes inorgánicos. El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principalmente requeridos son el fósforo y el nitrógeno, por tanto, las concentraciones asimilables de dichos elementos presentes en el suelo suelen ser limitantes para un incremento y activación de la población microbiana, mientras que otros nutrientes esenciales como el Ca^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} y SO_4^{2-} ya están presentes en cantidades suficientes.

La adición de fuentes de N y P inorgánicas generalmente tiene un efecto positivo incrementando las poblaciones microbianas y las tasas de biodegradación de hidrocarburos en suelos contaminados. Aunque en general la adición de fuentes inorgánicas de N y P al suelo es beneficiosa para los procesos de biodegradación, de igual manera, el uso excesivo de nutrientes inorgánicos también puede inhibir los procesos de biodegradación (Ponce, 2014).

2.4.3.2 Factores microbiológicos

El factor microbiológico más importante en la biorremediación es la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por acción de las enzimas. La biodegradación de un compuesto específico es frecuentemente un proceso que se realiza paso a paso en el cual se involucran muchas enzimas y muchos organismos. Las enzimas son específicas en términos de los compuestos que atacan y las reacciones que catalizan. Más de una enzima es normalmente requerida para romper una sustancia orgánica. Frecuentemente, los organismos que tienen las enzimas para degradar están presentes en el suelo (Torres & Zuluaga, 2009).

2.4.4 Microorganismos en la biorremediación

Los microorganismos hacen parte fundamental de los procesos de biorremediación. En gran parte, las bacterias casi siempre son los degradadores primarios, aunque

también se han empleado otros microorganismos como hongos, algas, cianobacterias y actinomicetos para la degradación (Benavides, 2006).

Las bacterias son el grupo de organismos más abundante en los suelos y la cantidad de especies presentes en el mismo parece relativamente constante alrededor del mundo. Dichos organismos son un grupo diverso con variaciones extensivas en las propiedades morfológicas, ecológicas y fisiológicas y son los principales degradadores de compuestos orgánicos naturales y xenobióticos encontrados en el suelo. Las más comunes son *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Vibrio*, *Acinetobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium* y *Flavobacterium* (Sudip, 2002). Por su diversidad, las bacterias se encuentran regularmente en comunidades heterogéneas; algunas especies son degradadores primarios, es decir, ellas inician la degradación de la materia orgánica en el suelo; otras crecen en compuestos resultantes de la degradación parcial de complejos orgánicos o productos residuales de degradadores primarios (Torres & Zuluaga, 2009).

2.4.5 Ventajas y desventajas de la biorremediación

La biorremediación ofrece muchas ventajas sobre los tratamientos físicos y químicos utilizados para tratar agua y suelo contaminado. La biorremediación suele tener menos costos que otros tratamientos, como la incineración. Otra ventaja es que tiene como objeto degradar y detoxificar contaminantes peligrosos, mientras que otras tecnologías simplemente transfieren los contaminantes a una localización diferente. Así, es un procedimiento sencillo comparado con otros.

Una de las desventajas de la biorremediación es la dificultad para predecir el funcionamiento de este tratamiento. El éxito de un proyecto de este tipo es dependiente de la habilidad de los operadores del proceso para crear y mantener las condiciones ambientales necesarios para el crecimiento microbiana. En algunas ocasiones la biorremediación no será útil cuando los contaminantes no sean degradables, o parcialmente biodegradables, o porque los niveles de contaminantes son tan altos que la actividad microbiana se ve afectada (Razo, 2003).

2.5 GRUPO EMPRESARIAL SOLANCO

Es una organización con responsabilidad de innovación en la formulación, producción, comercialización y distribución de productos BIO, ECO o químicos los

cuales, satisfacen las necesidades del sector de agroindustriales e hidrocarburos, aportando al desarrollo sostenible y mejoramiento del medio ambiente, con equidad social. Generando valor a las cadenas productivas nacionales e internacionales (SOLANCO, s.f.).

2.5.1 GODOIL

Es un desarrollo científico compuesto por nanopartículas, con composición de extractos vegetales que se encuentran presentes en las plantas, (carbono, nitrógeno, entre otros), que reacciona como biorremediador y fertilizante hidrosoluble, dividiendo las moléculas de hidrocarburo y grasas, siendo un efectivo agente natural, altamente concentrado. Este producto por su composición actúa como alimento para las bacterias ayudando a la descomposición de las cadenas de hidrocarburo. No tiene contra indicaciones, no es corrosivo, inflamable ni hace daño a la salud.

Esta solución asegura por su composición la biorremediación de cualquier derrame o suciedad producida por hidrocarburos o cualquiera de sus derivados, minimizando la utilización de los recursos naturales. Al mantener carbono orgánico oxidable vegetal aporta a los ecosistemas bienestar. (SOLANCO, s.f.)

2.5.2 Alcances del GODOIL

- Agente biorremediador en agua y suelo
- Lavado de buques plataformas marinas
- Lavado de pisos y paredes industriales
- Lavado de herramientas
- Lavado de tanques

2.5.3 Antecedentes GODOIL

El grupo empresarial SOLANCO S.A ha implementado este producto para descontaminar fuentes hídricas en puerto Boyacá y de ACPM en la represa de Betania, además hacen uso del producto para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el método Landfarming (Solano, 2014).

2.6 CEAGRODEX

Es un abono 100% orgánico, generado a partir de la descomposición de estiércol y contenido rumial, restos de animales bovinos, lodos PTAR, material vegetal como restos de podas (ramas, hojas, césped), cascara de frutas- hortalizas y Cal (Sánchez & Velásquez, 2018).

2.6.1 Beneficios

Nivel biológico

- Aumenta la flora microbiana beneficiosa
- Aumenta la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades.

Nivel físico

- Mejora la aireación y capacidad de retención de agua y nutrientes.
- Mejora la capacidad de germinación de las semillas.
- Reduce la erosión del suelo.
- Mejora el manejo del suelo.

Nivel químico

- Enriquece el suelo de sustancias orgánicas y minerales esenciales.
- Promueve la asimilación de los nutrientes transformándolos en formas asimilables.
- Conserva y eleva el contenido orgánico del suelo.

2.6.2 Antecedentes

En el proyecto de investigación “Variación porcentual de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados mediante el uso de abono 100% orgánico” (Bermeo & Pérez, 2017) se evaluó el abono orgánico de la empresa CEAGRODEX como agente biorremediador, se desarrolló mediante un diseño experimental basado en 12 muestras preparadas con el mismo tipo de suelo y variación de la carga contaminante, a las cuales se les realizó la prueba de TPH a diferentes tiempos para determinar la eficiencia del abono, analizando qué relación de suelo : abono era más favorable para el caso, de esto se concluyó que la mejor

relación era la de 1 : 2; sin embargo, desde las 1 : 1 era buena pero claramente el resultado era más lento.

2.7 HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO (TPH)

El término TPH se usa para describir a un grupo de sustancias químicas, derivadas del petróleo crudo, 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 contaminada, que sirve como indicador general del tipo de contaminación (Ponce, 2014).

Los TPH son una mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono, llamados hidrocarburos. Los científicos han dividido a los TPH en grupos de hidrocarburos de petróleo que se comportan en forma similar en el suelo o el agua. Estos grupos se llaman fracciones de hidrocarburos de petróleo. Cada fracción contiene muchos productos químicos individuales. Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los TPH incluyen a hexano, combustibles de aviones de reacción, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina, y fluoreno, como también otros productos de petróleo y componentes de gasolina (ATSDR, 1999).

2.8 LEGISLACIÓN AMBIENTAL

Los lodos aceitosos generados en las líneas y tanques de producción de la industria petrolera son catalogados como residuos peligrosos (RESPEL), considerados como fuentes de riesgo para el medio ambiente y la salud. Estos residuos generados a partir de actividades minero – energéticas constituyen un tema ambiental de especial importancia en razón su elevado volumen (Ministerio de Ambiente, 2005).

Los fundamentos para la reglamentación de Residuos o desechos peligrosos en Colombia están contenidos principalmente en la Constitución Política Nacional de 1991, el Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente - (Decreto Ley 2811 de 1974), la Ley 99 de 1993, la Ley 253 de 1996 que ratifica el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación, la Ley 430 del 16 de enero de 1998, por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones, la Ley 994 de 2005 por la cual se aprueba

el Convenio de Estocolmo, el Capítulo 20 de la Agenda 21 de la Conferencia de Río de 1992 de las Naciones Unidas y la declaración de la Cumbre de Johannesburgo; y la Política de Producción Más Limpia, entre otras (Ministerio del medio ambiente, s.f.).

Las bases más importantes de la Política para la Gestión Integral de los Residuos o Desechos Peligrosos son:

- Priorización de la gestión en el marco de la Política.
- La minimización mediante la prevención de la generación, así como el aprovechamiento y la valorización, es la prioridad de la gestión integral de los RESPEL.
- El tratamiento de los RESPEL debe permitir la reducción de su volumen y/o peligrosidad, mediante la aplicación a un costo razonable de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales.
- La disposición final de los RESPEL debe, en la medida de lo posible, limitarse a aquellos que no sean aprovechables o cuyo reciclado por el momento no sea económico o técnicamente factible.

Según el anexo I y II del decreto 4741 del 2005, los lodos y borras con contenido de hidrocarburos y sustancias químicas están clasificados en la categoría Y9 (mezclas de emulsiones de desechos de aceites y agua o de hidrocarburos y agua). Según su característica de peligrosidad (CRETIP), estos lodos están clasificados como solidos inflamables (Ministerio de ambiente, 2005).

En la disposición final de borras por el proceso de biorremediación es indispensable la medición del TPH del suelo, para así dar veracidad a que este cumple con los límites permisibles en el país. En Colombia se implementa la norma internacional del Protocolo de Louisiana 29B (Rosero, Reyes, & Pinzón, 2016), que establece como valor máximo permisible de TPH el 3%; sin embargo, el Instituto Americano del Petróleo (API) establece que el valor máximo permitido de TPH es 1%, este valor se basa principalmente en dos criterios: el efecto de toxicidad para las plantas y la movilidad de los hidrocarburos hacia el agua subterránea (Méndez, Rennola, & Peña, 2011).

3. MARCO EXPERIMENTAL

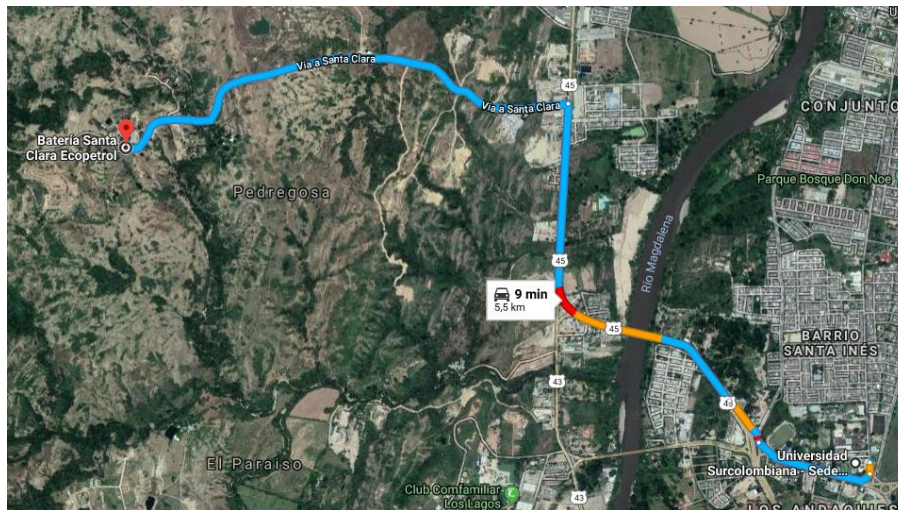
3.1 OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN

3.1.1 Suelo

3.1.1.1 Obtención

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza una muestra de suelo de la finca “La Bonita” ubicada en cercanías a la batería Santa Clara, aproximadamente a 5,5 kilómetros de la Universidad Surcolombiana sede central, como se muestra en la Ilustración 2. La recolección de la muestra se lleva a cabo el primero de octubre del 2018, esta es tamizada y llevada al laboratorio de Fluidos de perforación y completamiento para realizar el montaje de las eras.

Ilustración 2. Ubicación finca “La Bonita”



Fuente. Autores

3.1.1.2 Caracterización

La muestra de suelo se caracteriza en los laboratorios de suelos y química de la Universidad Surcolombiana llevando a cabo las pruebas que se describen en el ANEXO A. Obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización del suelo.

Color	Light olive Brown
Conductividad	255 Mv
Densidad	1.26 g/mL
Humedad	18 %
pH	6.33
Porosidad	56.5 %
Tipo	Franco arcillo arenosa

Fuente: Laboratorio de suelos y laboratorio de química de la Universidad Surcolombiana

Por las características del suelo que se muestran en la Tabla 3. Se considera suelo franco arcillo arenosa. Estos suelos son fértiles y al secarse forman pequeños terrones que se deshacen. Teóricamente estos suelos tienen una composición equilibrada de cada mineral es un suelo fácil de trabajar y con buenas reservas de nutrientes. Otras características que se pueden describir según su textura son una adhesividad alta, infiltración, retención de humedad y aireación regular. Este suelo presenta un pH alcalino, las mejores condiciones para el desarrollo de las plantas.

3.1.2 Borra

3.1.2.1 Obtención

Las borras se obtienen por la gestión de la directora del proyecto con la empresa ECOPETROL, quienes hacen llegar con su personal las borras a la Universidad Surcolombiana.

3.1.2.2 Caracterización

La caracterización de las borras se realiza en el laboratorio de Crudos y Derivados de la Universidad Surcolombiana llevando a cabo las pruebas de Determinación de API, BSW, Viscosidad y Contenido de Sal, las cuales se describen en el ANEXO B. Obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de la borra

° API		10.23
%BSW	Solidos	40 %
	Agua	12.5 %
	Crudo	47.5 %
VISCOSIDAD	100 °C	113.77 cSt
	122 °C	70.87 cSt
	130 °C	70.58 cSt
SALINIDAD		5.5 PTB

Fuente: Laboratorio Crudos y Derivados de la Universidad Surcolombiana

Según los resultados mostrados en la Tabla 4, se puede caracterizar a la borra como pesada debido a su bajo valor de °API (10.23), además lo anterior se ve reflejado en los altos valores de viscosidad presentados a diferentes temperaturas. El alto porcentaje de solidos y agua también muestran el porqué de la problemática ocasionada por las borras tanto en tuberías de producción como en facilidades de superficie en temas de taponamiento y corrosión.

3.1.3 GODOIL

3.1.3.1 Obtención

El producto GODOIL se obtiene por la gestión de la directora del proyecto con el GRUPO EMPRESARIAL SOLANCO S.A, quienes hacen llegar un litro del producto a la Universidad Surcolombiana.

3.1.3.2 Caracterización

La caracterización del producto GODOIL se obtiene de su ficha técnica (Ver Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Composición Química GODOIL

COMPONENTE	APORTE (g/L)
NITRÓGENO	12
FOSFORO	8.3

COMPONENTE	APORTE (g/L)
POTASIO	8.3
NITRÓGENO ORGÁNICO	3.42
CARBONO ORGÁNICO OXIDABLE	58

Fuente: Grupo empresarial Solanco S.A

Tabla 6. Especificaciones Fisicoquímicas GODOIL

Apariencia, olor y estado físico	Líquido blanco. Suave olor a coco. Concentrado
Punto de ebullición (°C)	180 (100%)
Punto de fusión (°C)	1 (98%)
Densidad relativa	0.881
Viscosidad (cp)	21 / 25°C
pH	10.8
Conductividad eléctrica	0.53 dS/m
Solubilidad	Soluble en agua y alcohol

Fuente: Grupo empresarial Solanco S.A

El producto presenta un alto valor de temperatura de ebullición y baja temperatura de fusión, por lo que el producto puede someterse a un amplio rango de trabajo sin perder propiedades o características, por su valor de pH se considera alcalino. Su densidad y viscosidad es relativamente baja, lo cual podría ser un factor de su fácil y posible solubilidad con agua.

3.1.4 Abono CEAGRODÉX

3.1.4.1 Obtención

La directora del proyecto facilita el producto para llevar a cabo una fase del trabajo.

3.1.4.2 Caracterización

La caracterización del abono CEAGRODEX se obtiene de su ficha técnica (Ver Tabla 7, 8 y 9).

Tabla 7. Generalidades del abono CEAGRODEX

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

Fuente: Ficha técnica del fertilizante CEAGRODEX

Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas del abono CEAGRODEX

Estado físico	Sólido de granos irregulares
Humedad	35.5%
Cenizas	41.1%
Carbono oxidable	27%
Capacidad de intercambio catiónico	39.8 ME/100 gr
C/N	14.5
Capacidad de retención de Humedad	192%
Densidad	0.19 gr/cm ³
pH	7.23
Nitrógeno total (N)	1.86%
Fósforo total (P ₂ O ₅)	1.701%
Potasio total (K ₂ O)	0.433%
Color	Café
Olor	Amoniacal y geosminas

Fuente: Ficha técnica del fertilizante orgánico CEAGRODEX

Tabla 9. Microorganismos presentes en abono de CEAGRODEX

Mesófilos (Ufc/g)	Termófilos (Ufc/g)	Mohos (Ufc/g)	Levaduras (Ufc/g)	Nematodos y/o protozoos	Entero bacterias (Ufc/g)	Salmonella en 25 gr
1.8 E+10	2.10 E+11	1 E+10	0.00 E+0	Ausentes	0.00 E+0	Ausentes

Fuente: Ficha técnica del fertilizante orgánico CEAGRODEX

Es un abono 100% orgánico, generado a partir de la descomposición de estiércol y contenido rumial, restos de animales bovinos, lodos PTAR, material vegetal como restos de podas (ramas, hojas, césped), cascaras de frutas- hortalizas y Cal.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Como se ha mencionado, este proyecto se centra en la evaluación de la eficiencia de un producto orgánico “GODOIL” en la biorremediación de suelo contaminado con borras; este producto es fabricado y usado por el grupo empresarial Solanco S.A para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en concentraciones de 50000 ppm en el suelo por un tiempo de 45 días.

Para la evaluación del GODOIL como biorremediador de borras, se plantea el diseño de las ERAS de manera que se pueda comparar la eficiencia del producto en diferentes concentraciones y en diferentes valores de TPH, por lo que se decide que la cantidad de ERAS a trabajar son veinte, distribuidas en cinco categorías que depende de la concentración de GODOIL que se aplica y cada categoría con cuatro valores diferentes de TPH. Se tiene en cuenta que se dispone de 300 gramos de borra, 1000 ml de GODOIL y 1000 gramos de suelo, por lo que se identifica que la borra es el factor limitante para la preparación de las ERAS. Con la caracterización de las borras mencionada en la Tabla 4, se tiene que el porcentaje de hidrocarburo que contiene es de 47.5%, como se desea obtener la eficiencia del producto en borras, se decide utilizar el mayor valor de TPH posible (45%), sin olvidar que la ERA debe contener suelo ya que es el portador de las bacterias. Como menor valor de TPH se decide utilizar la quinta parte del máximo valor (9%), el siguiente valor de TPH se toma como doble del mínimo (18%) y el restante sea el doble del anteriormente mencionado (36%).

Con los porcentajes de TPH ya establecidos se realiza la distribución de las borras de tal manera que se logren obtener las veinte ERAS. La distribución de las borras se realiza tomando como base, que el total de las ERAS para los TPH de 9%, 18%

y 36% sea de 23.75 gramos y para el TPH de 45% sea de 26.4 gramos, entendiendo como total de las ERAS el conjunto de suelo y borra. Los valores totales son el resultado de un proceso de ensayo y error.

A continuación, se muestra los cálculos que se realizan para determinación de los gramos de hidrocarburo utilizado para los diferentes TPH.

- **TPH 9%**

$$23.75 \text{ gramos TOTAL ERA} * 9 \% = 2.1375 \text{ gramos hidrocarburo}$$

- **TPH 18%**

$$23.75 \text{ gramos TOTAL ERA} * 18 \% = 4.275 \text{ gramos hidrocarburo}$$

- **TPH 36%**

$$23.75 \text{ gramos TOTAL ERA} * 36 \% = 8.55 \text{ gramos hidrocarburo}$$

- **TPH 45%**

$$26.4 \text{ gramos TOTAL ERA} * 45 \% = 11.88 \text{ gramos hidrocarburo}$$

Ya obtenidos los gramos de hidrocarburo necesario, se realizan los cálculos para hallar la cantidad de borra a utilizar. Se toma como base de cálculo 100 gramos de borra con un porcentaje en peso de hidrocarburo de 47.5% así:

- **TPH 9%**

$$100 \text{ gramos de borra} \rightarrow 47.5 \text{ gramos de hidrocarburo}$$

$$x \text{ gramos de borra} \rightarrow 2.1375 \text{ gramos de hidrocarburo}$$

$$x \text{ gramos borra} = \frac{2.1375 \text{ gramos de hidrocarburo} * 100 \text{ gramos borra}}{47.5 \text{ gramos de hidrocarburo}}$$

$$x \text{ gramos borra} = 4.5 \text{ gramos de borra}$$

Ahora se realiza el cálculo para determinar la cantidad de suelo a añadir

$$\text{gramos de suelo} = \text{gramos Total ERA} - \text{gramos de borra}$$

$$\text{gramos de suelo} = 23.75 \text{ gramos Total ERA} - 4.5 \text{ gramos de borra}$$

$$\text{gramos de suelo} = 19.25$$

El procedimiento anterior se repite para los porcentajes de TPH de 18%, 36% y 45%. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Composición ERAS diferentes TPH

TPH (%)	SUELO (gramos)	BORRA (gramos)
9	19.25	4.5
18	14.75	9
36	5.75	18
45	1.4	25

Fuente: Autores

Teniendo las cantidades correspondientes para los diferentes valores de TPH, se procede a establecer las diferentes concentraciones de producto que se añade a cada ERA. La cantidad de referencia de producto es de 50000 ppm en el suelo, es decir, 5% de producto en porcentaje en peso. Entendiendo como producto, la mezcla de GODOIL y agua a concentraciones de 70% y 30% respectivamente.

Cálculo de gramos de producto para THP de 9%, 18% y 36%

100 gramos de suelo → 5 gramos de producto

23.75 gramos de suelo → x gramos de producto

1.2 gramos de producto

Cálculo de gramos de producto para TPH de 45%

100 gramos de suelo → 5 gramos de producto

26.4 gramos de suelo → x gramos de producto

1.3 gramos de producto

Como se observa en los cálculos anteriores la diferencia de cantidad de producto de los TPH 9%,18%,36% con respecto a la cantidad de producto de 45% es despreciable, por ende, se utiliza 1.3 gramos de producto para todos los valores. Esta cantidad de producto se debe convertir a unidades volumétricas debido a que se tiene en fase líquida, para ello se realiza el cálculo de la densidad de la mezcla (agua + GODOIL), en este cálculo se tiene en cuenta la densidad de cada componente y como base de cálculo 1000 mL de producto.

Partiendo de lo anterior, la densidad del agua se toma como 1 g/mL y la densidad del GODOIL es la especificada por el fabricante. Con la relación de volúmenes y las densidades se obtiene la masa de cada componente y por ende el de la mezcla, con el que finalmente se obtiene la densidad del producto, como se resume en la Tabla 11.

Tabla 11. Densidad del producto

	DENSIDAD (g/mL)	Volumen (mL)	Masa (g)
GODOIL	0.881	700	616.7
AGUA	1	300	300
MEZCLA	0.9167	1000	916.7

Fuente: Autores

Con la densidad del producto obtenida, se procede a realizar la conversión de unidades masa a volumen de la cantidad del producto.

$$\text{Volumen de producto} = \frac{\text{masa de producto}}{\text{densidad del producto}}$$

$$\text{Volumen de producto} = \frac{1.3 \text{ gramos de producto}}{0.9167 \text{ gramos de producto/mL}}$$

$$\text{Volumen de producto} = 1.4 \text{ mL de producto}$$

El resultado que se obtiene es que por referencia y recomendación de la empresa SOLANCO S.A, se debe usar 1.4 mL de producto para la biorremediación, sin embargo, como anteriormente se mencionó, se busca evaluar la eficiencia del producto a diferentes concentraciones y relaciones de producto, por ello, se decide evaluar a concentración de referencia en el grupo categorizado A, al 50% del valor de referencia en el grupo categorizado B, incrementar un 50% el valor de referencia en el grupo categorizado C y duplicar la concentración del valor de referencia en el grupo categorizado D. Además de esto se decide añadir un quinto grupo categorizado E con las mismas especificaciones del A en el cual se prueba la influencia de agregar por relación en peso 1:1 fertilizante orgánico CEAGRODEX; este fertilizante es agregado a los 29 días de haber realizado el montaje de las ERAS.

En la Tabla 12. se muestra la relación de suelo, borra y producto inicial (día 1) con la que cuenta cada ERA.

Tabla 12. Relación suelo, borra y producto de cada ERA

CATEGORÍA	ERA	TPH (%)	SUELO (gr)	BORRA (gr)	PRODUCTO INICIAL (mL)	RELACIÓN PRODUCTO
A	1	9	19.25	4.5	1.4	1
	2	18	14.75	9		
	3	36	5.75	18		
	4	45	1.4	25		
B	5	9	19.25	4.5	0.7	0.5
	6	18	14.75	9		
	7	36	5.75	18		
	8	45	1.4	25		
C	9	9	19.25	4.5	2.1	1.5
	10	18	14.75	9		
	11	36	5.75	18		
	12	45	1.4	25		
D	13	9	19.25	4.5	2.8	2
	14	18	14.75	9		
	15	36	5.75	18		
	16	45	1.4	25		
E	17	9	19.25	4.5	1.4	1
	18	18	14.75	9		
	19	36	5.75	18		
	20	45	1.4	25		

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta las cantidades de suelo, borra y producto anteriormente mencionados se procede al montaje de las veinte (20) ERAS, tomando igual número de recipientes de plástico identificándolas por su categoría en el laboratorio de Fluidos de perforación y completamiento; inicialmente se agrega la cantidad de suelo en cada uno de los recipientes con ayuda de una balanza como se muestra en la Ilustración 3.

Ilustración 3. Adición de suelo a la muestra



Fuente. Autores

A continuación, se mezcla la borra para garantizar que esta sea homogénea y se agrega la cantidad necesaria a cada una de las muestras como se observa en la Ilustración 4.

Ilustración 4. Adición de borra en el suelo dispuesto a contaminar



Fuente. Autores

Seguido de esto se mezcla con una espátula para homogenizar toda la borra en el suelo y finalmente se adiciona la cantidad de producto correspondiente para cada ERA (Ver Ilustración 5).

Ilustración 5. Montaje final de ERAS



Fuente. Autores

Durante el tiempo del proyecto, diariamente a cada una de las ERAS se le mide el pH para verificar que este se encuentra en los rangos óptimos para la supervivencia de las bacterias, en este caso se mantiene bajo un PH de 7.0 - 7.3; además, se aplica producto para controlar la humedad a condiciones adecuadas para la supervivencia microbiana y acelerar el proceso de biorremediación por el suministro de nutrientes y agua. La cantidad de producto y que se adiciona durante la investigación se divide en 3 etapas.

La primera etapa se establece entre los días 0 y 10. En esta etapa se adicionaba mayor cantidad de producto a las ERAS de TPH menor (TPH = 9 Y 18) en comparación a las de mayor TPH (TPH = 36 Y 45) en la que la adición de este fue casi nula, esto debido a que se tenía precaución con la humedad de las muestras, puesto que las de mayor TPH (TPH = 36 Y 45) contaban con mayor cantidad de agua y muy poco suelo; sin embargo, al transcurrir de una semana se observa que las muestras de mayor TPH han disminuido su humedad y por ende se decide comenzar a añadir la misma cantidad de producto a todas las ERAS, guardando su respectiva relación, a lo que se le atribuye como la segunda etapa entre los días 11 y 30. Para la tercera etapa, días comprendidos entre 31 y 48, y por recomendación de personal con experiencia en el proceso de biorremediación de suelos, se decide

llevar las muestras a una mayor humedad, es decir, se añade mayor cantidad de producto a todas las ERAS, guardando su respectiva relación.

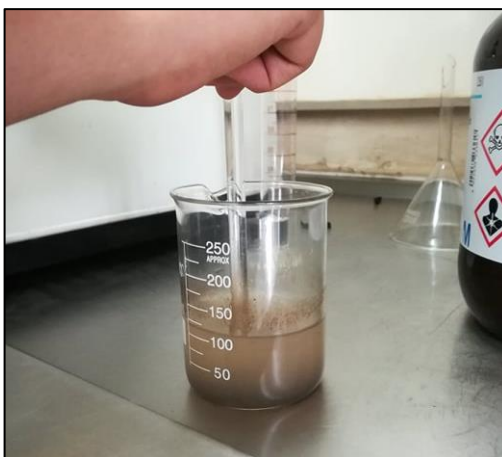
3.3 MEDICIÓN DE TPH

Se realiza la medición del TPH en cada una de las muestras para visualizar la eficiencia que ha tenido el producto en relación con el tiempo. Teniendo en cuenta que el producto biorremedia suelos contaminados con hidrocarburos en un lapso aproximado de 45 días, se establece realizar 3 pruebas aproximadamente cada 15 días, según disposición del laboratorio de Crudos y Derivados. Lo anterior bajo la teoría del Método Gravimétrico Modificado (Extracción con solvente) – SOXHLET (Ver ANEXO C).

Para empezar, se pesa una capsula de vidrio vacía para tomar como referencia al final de la prueba, comparar la diferencia de pesos y así determinar el peso de los hidrocarburos presentes en cada una de las muestras.

Se agrega 1 gramo de suelo contaminado en un Beaker utilizando una balanza analítica y se diluye en 100 mL de agua destilada a 40 °C aproximadamente, agitando constantemente hasta obtener una dilución del suelo en el agua. A la mezcla de agua y suelo se le agrega cloroformo de manera gradual, es decir, 10 mL de cloroformo y agitando hasta que se observe cómo se desprenden los hidrocarburos del suelo (Ver Ilustración 6).

Ilustración 6. Mezcla de Suelo, agua y cloroformo.



Fuente: Autores

Seguido de esto, se vierte la mezcla en el embudo de decantación mientras se visualiza la separación de las fases aceite y agua (Ver Ilustración 7).

Ilustración 7. Embudo de decantación – Separación de fases.



Fuente. Autores

El residuo sólido se separa para su posterior proceso de filtrado. Teniendo la mezcla en el embudo de decantación y después de agitar se extrae la fase aceitosa en el recipiente de vidrio mencionado y pesado inicialmente haciéndolo pasar por una malla de filtrado para eliminar los sólidos que allí se encuentran, por consiguiente, se elimina el residuo de la fase acuosa (Ver Ilustración 8).

Ilustración 8. Resultado decantación – Crudo y cloroformo.



Fuente. Autores

Ahora, los sólidos que se separan anteriormente se pasan por la malla de filtrado y se lavan con 5 a 10 mL de cloroformo con el fin de lavar por completo el suelo y

extraer hasta la última gota de hidrocarburo presente en él, para finalmente hacerlo pasar de nuevo por el embudo de decantación y poder terminar de separar las fases (Ver Ilustración 9).

Ilustración 9. Decantación final

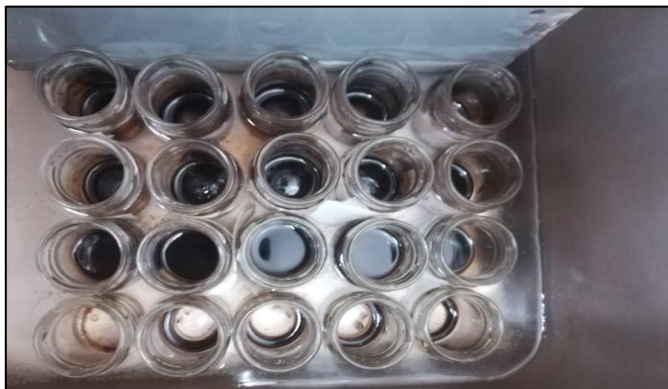


Fuente. Autores

Por último, se coloca la fase aceitosa que se encuentra en el recipiente de vidrio en baño de María a una temperatura superior a la temperatura de ebullición del cloroformo para eliminar o evaporar lo que aún está presente y separar por completo el hidrocarburo contenido, es decir, hasta que se observe un volumen constante por un lapso considerable.

Lo anterior se repite para cada una de las veinte (20) muestras como se observa en la Ilustración 10.

Ilustración 10. Baño de maría para evaporar el cloroformo



Fuente. Autores

Finalmente, se sacan las muestras del baño de maría, se dejan enfriar y se pesan para obtener su peso final y poder calcular cual es el peso real de los hidrocarburos presentes y por ende su porcentaje, así

$$\text{Peso de hidrocarburo (gr)} = \text{Peso final recipiente} - \text{Peso inicial recipiente}$$

$$\%TPH = \left(\frac{\text{Peso de hidrocarburo (gr)}}{\text{Peso de la muestra (gr)}} \right) * 100$$

4. RESULTADOS

A partir de las pruebas realizadas en el laboratorio de Crudos y Derivados se determina el porcentaje de TPH de las ERAS, al tiempo de 19, 33 y 48 días, como se muestra en la Tabla 13. Además, en la tabla se muestra la relación de producto que se aplica a cada una de las ERAS. El (*) indica a cuáles muestras se les añadió abono CEAGRODEX.

Tabla 13. Resultados porcentaje de TPH

Relación producto	Día ERA	0 TPH (%)	19 TPH (%)	33 TPH (%)	48 TPH (%)
1	1	9	1,54	0,36	ND
0,5	5	9	1,69	0,39	ND
1,5	9	9	1,44	0,34	ND
2	13	9	1,09	0,30	ND
1 *	17	9	1,84	0,18	ND
1	2	18	13,62	2,79	0,09
0,5	6	18	14,68	2,96	0,12
1,5	10	18	13,50	2,34	0,08
2	14	18	11,99	1,78	0,04
1 *	18	18	13,56	1,59	0,01
1	3	36	34,43	13,23	0,41
0,5	7	36	35,39	17,03	0,48
1,5	11	36	33,71	11,86	0,38
2	15	36	32,43	6,62	0,30
1 *	19	36	34,80	5,24	0,12
1	4	45	42,22	19,02	0,85
0,5	8	45	43,23	22,39	0,91
1,5	12	45	37,00	18,30	0,70
2	16	45	36,66	13,04	0,40
1 *	20	45	42,86	8,85	0,19

Fuente: Autores

-ND: No detectable por el método aplicado.

En la primera prueba realizada en el día 19, se evidencia la eficiencia del producto en la disminución del contenido de hidrocarburos para cada muestra. Con los resultados mostrados en la Tabla 13, se puede obtener que para las ERAS 1, 5, 9, 13 y 17 de TPH inicial del 9% disminuye un 83% aproximadamente en promedio,

para las ERAS 2, 6, 10, 14 y 18 de TPH inicial de 18%, la disminución es menor siendo del 25% aproximadamente en promedio, para las ERAS 3, 7, 11, 15 y 19 de TPH inicial del 36% y para las ERAS 4, 8, 12, 16 y 20 de TPH inicial del 45% la disminución fue similar y en relación a las anteriores mucho más baja, siendo los porcentajes de remoción del 8% y 7% respectivamente. Estos bajos porcentajes de remoción en las ERAS con mayor cantidad de borras, se le pueden atribuir a que en los primeros días se añade menor cantidad de producto a estas ERAS como se describe en el capítulo anterior para la primera etapa de adición de producto, lo cual influye directamente en el poco aporte de nutrientes a los microorganismos, de igual manera se puede tener una limitada cantidad de agua para el transporte de estos.

Por otro lado, se tiene en cuenta que las ERAS con mayor cantidad de suelo añadido inicialmente fueron las eras de TPH inicial del 9%, esto puede incidir directamente en por que son las que tienen un mayor porcentaje de remoción, pues al tener un mayor contenido de suelo es probable que exista mayor cantidad de microorganismos en estas, y, así, durante el tiempo transcurrido han presentado mayor actividad microbiana para la descomposición de las cadenas de hidrocarburo. Lo anteriormente mencionado influye de igual manera en el resto de las muestras, y se ve reflejado de forma que las de contenido de TPH inicial del 18% presentan un valor de remoción menor a las de TPH inicial del 9%, pero mucho mayor que las ERAS de TPH inicial del 36% y 45% que contienen menor cantidad de suelo, y, por ende, estas requieran de mayor tiempo para aumentar su biodisponibilidad.

Además de evidenciar la eficiencia del producto, observamos que la disminución del TPH en cada muestra presenta un comportamiento directo en contraste a la relación de producto que se le añade, es decir, en las muestras a las que se les añade 1.4 mL de producto diario, presentan mayor disminución de TPH con respecto a las que se les añade 0.7 mL de producto, pero presentan una menor disminución en comparación con las muestras que se les añade 2.1 mL y 2.8 mL de producto. Este comportamiento se evidencia en todos los grupos de diferentes TPH.

Según el protocolo de Louisiana 29B el valor de TPH permisible es menor al 3%, por lo que las eras 1,5,9,13 y 17 para el día 19 ya cumplen con la norma internacional, sin embargo, el valor de TPH permisible establecido por el API es menor al 1%, lo que aún no cumplen estas muestras, por ende, se continua con el proceso.

De los datos obtenidos en la segunda prueba, al día 33, se tiene que para las ERAS de TPH inicial del 9%, el porcentaje en promedio de remoción es del 97%, lo que

indica un valor muy optimista y sigue reflejando la eficiencia del producto para la biorremediación de suelos contaminados con borras; como se muestra en la Tabla 13, en este punto los valores de TPH para estas ERAS (1, 5, 9, 13 y 17) es muy bajo e inferior al valor permisible establecido por el API ($\text{TPH} < 1\%$), por ende, a estas muestras no se les realiza más pruebas. De igual manera para las eras de TPH inicial del 18%, el porcentaje de remoción promedio es un valor muy optimista, siendo este del 87%, lo que indica que se ha removido la mayor parte de hidrocarburo que presentaban las muestras, sin embargo como se observa en la Tabla 13, aunque los valores de TPH son muy bajos y ya cumplen con lo establecido por la norma internacional de Louisiana 29B ($\text{TPH} < 3\%$), aún no están en los valores permisibles por la norma API, por esta razón se debe continuar con el proceso en estas muestras. En secuencia los porcentajes de remoción promedio para las muestras de TPH inicial del 36% y 45%, son valores muy favorables respecto a lo que se evidenció en la primera prueba, siendo estos del 71% y 64% respectivamente y aunque en ninguno de los dos casos se cumpla con la norma internacional de Louisiana 29B, dan buen indicio de la actividad microbiana. El aumento significativo de estos valores puede obedecer a que las cantidades de producto aplicado durante el tiempo transcurrido fue mucho más en comparación a los primeros días del proyecto y con ello se aumentó la biodisponibilidad y un buen aporte de nutrientes a los microorganismos.

Como se mencionó anteriormente, todos los porcentajes de remoción de TPH son favorables en la investigación, sin embargo, se observa que en relación a los valores obtenidos en la primera prueba con respecto a la segunda, los porcentajes de remoción tienen mayor incidencia en las muestras de TPH inicial del 36% y 45%, es decir, mientras la diferencia de porcentaje para las de ERAS de TPH inicial del 9% es de un 10% aproximadamente, para las ERAS de 36% y 45% de TPH inicial es de un 60% aproximadamente; de esto se puede inferir que la actividad microbiana es mucho mayor en mayores concentraciones de hidrocarburos, después de un determinado tiempo, en este caso después de 20 días aproximadamente. Lo anterior teniendo en cuenta que se debe encontrar en condiciones óptimas y con una buena fuente de nutrientes, que en este proyecto es aportado por el producto

Al igual que en los resultados obtenidos en la primera prueba, en estos también se observa que la disminución del TPH en cada muestra presenta un comportamiento directo en contraste a la relación de producto que se le añade.

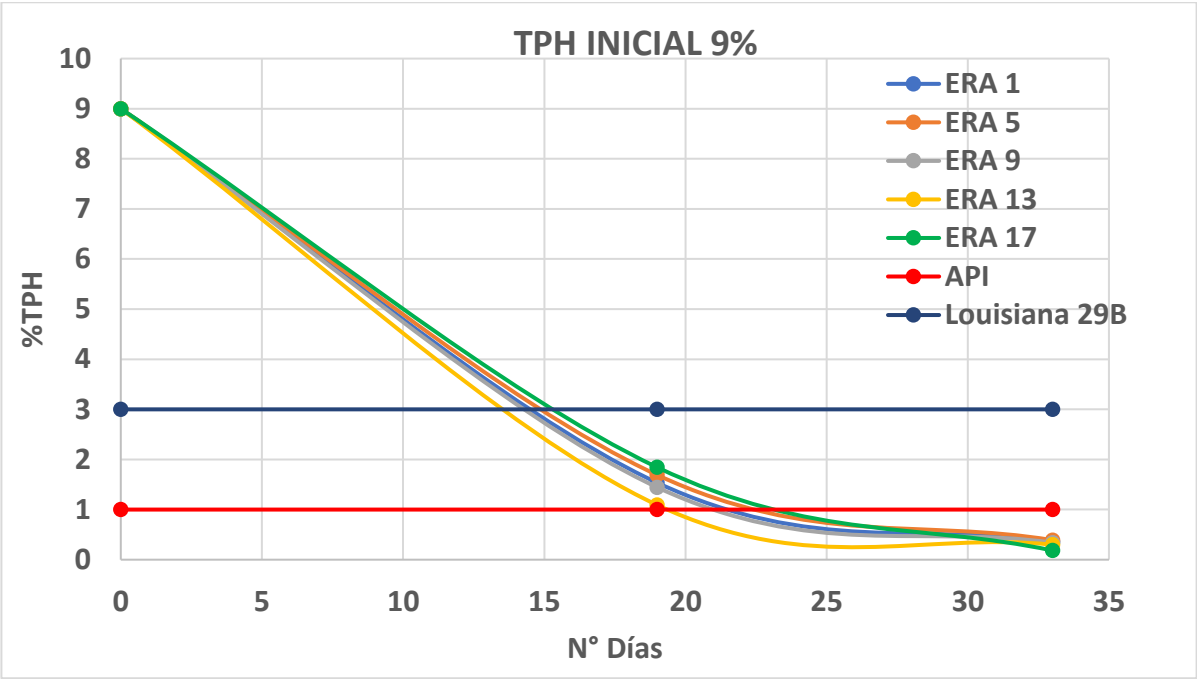
Las muestras señaladas con asterisco (*) en la Tabla 13, son aquellas a las que se les adiciona abono orgánico CEAGRODEX, como se menciona en el diseño

experimental el abono es añadido en el día 29, por ende, la influencia de este es visualizada en esta segunda prueba. Aunque tan solo han transcurrido 4 días desde la adición del abono, la influencia se evidencia por el hecho de que la relación de CEAGRODEX es 1:1 con respecto a la muestra, lo que indica que teóricamente se debe disminuir el contenido de hidrocarburos en aproximadamente un 50% el primer día. Si bien no se tiene un valor de TPH establecido para las muestras al día de añadir el abono, la comparación se hace en referencia a las muestras que contienen la misma relación de producto, teniendo en cuenta que los valores reales entre muestras pueden variar un poco. De los resultados obtenidos en la tabla 13, se evidencia que la disminución del 50% de TPH en las muestras con abono se cumple en su mayoría, solo en la ERA 18 no se cumple esta condición, pero su valor es muy cercano y esta variación puede ser despreciada. Para las ERAS 19 y 20 el valor de TPH se reduce en más de un 50%, lo que indica que, a pesar del poco tiempo, se refleja que el CEAGRODEX contribuye positivamente a la remoción de hidrocarburos en el suelo.

De los resultados obtenidos en la última prueba realizada en el día 48, se tiene que para todas las muestras el porcentaje de remoción en promedio es del 99%, además, todos los resultados de TPH son inferiores al 1%, lo que quiere decir, que todas las ERAS cumplen tanto la norma internacional de Louisiana, como la establecida por el API. De igual forma se sigue cumpliendo la relación de que la disminución del TPH en cada muestra presenta un comportamiento directo en contraste a la relación de producto que se le añade. Además, se ratifica que el aporte de abono a las muestras funciona de manera positiva, ayudando a remover el contenido de hidrocarburos a mayor relación de la que lo hace solo el producto, sin embargo, esta disminución de TPH no se evidencia significativamente.

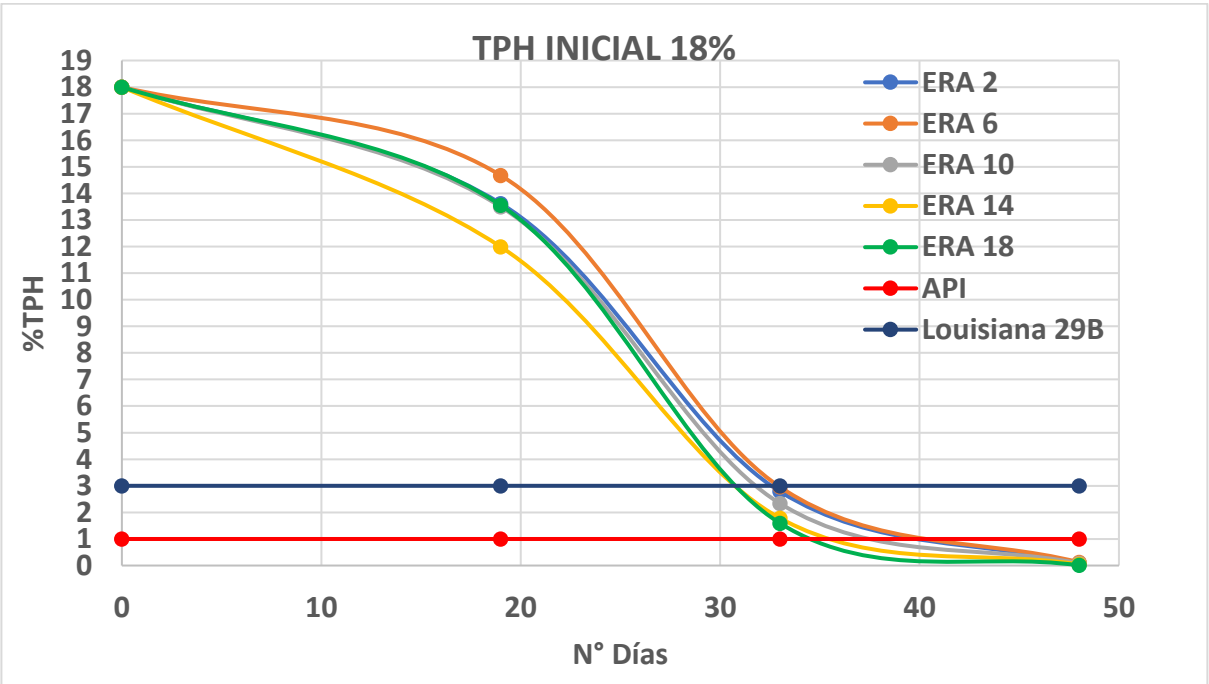
Con el fin de tener una mejor visualización de los resultados obtenidos, se realizan cuatro gráficas de manera que se evidencie la tendencia de remoción de TPH al transcurrir de los días, para cada grupo de diferente TPH inicial.

Gráfica 1. TPH INICIAL 9% (%TPH VS TIEMPO)



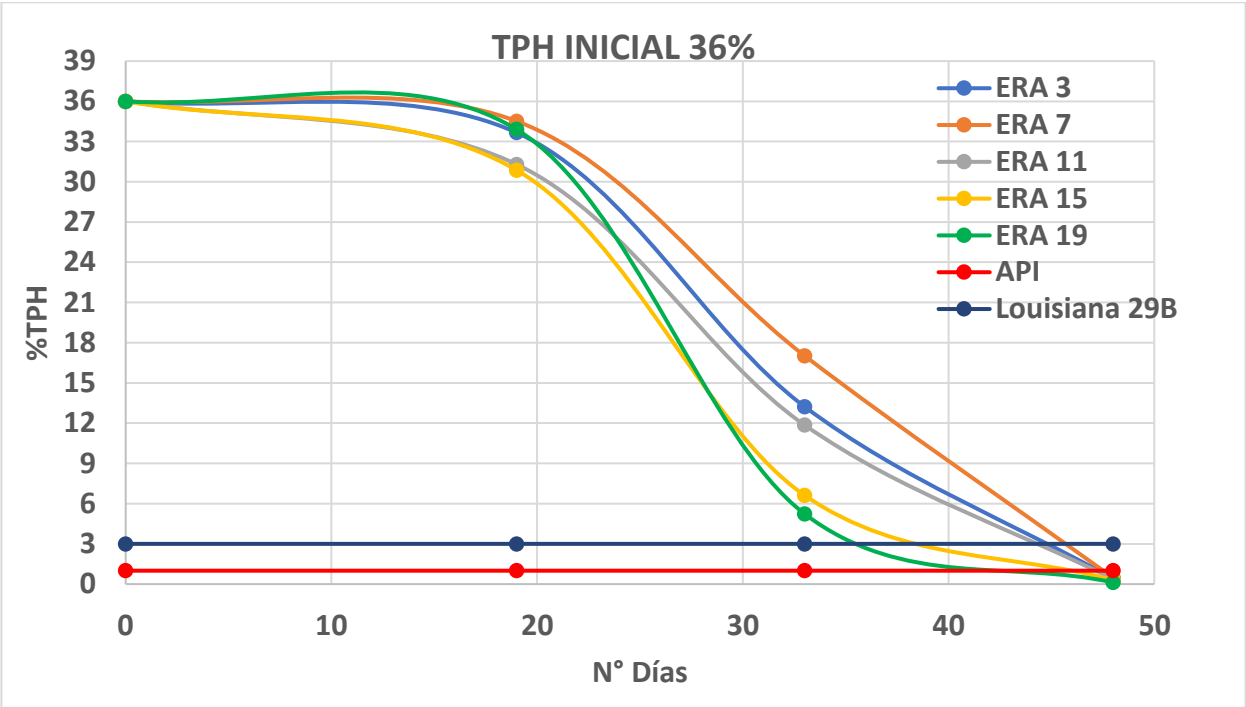
Fuente: Autores

Gráfica 2. TPH INICIAL 18% (%TPH VS TIEMPO)



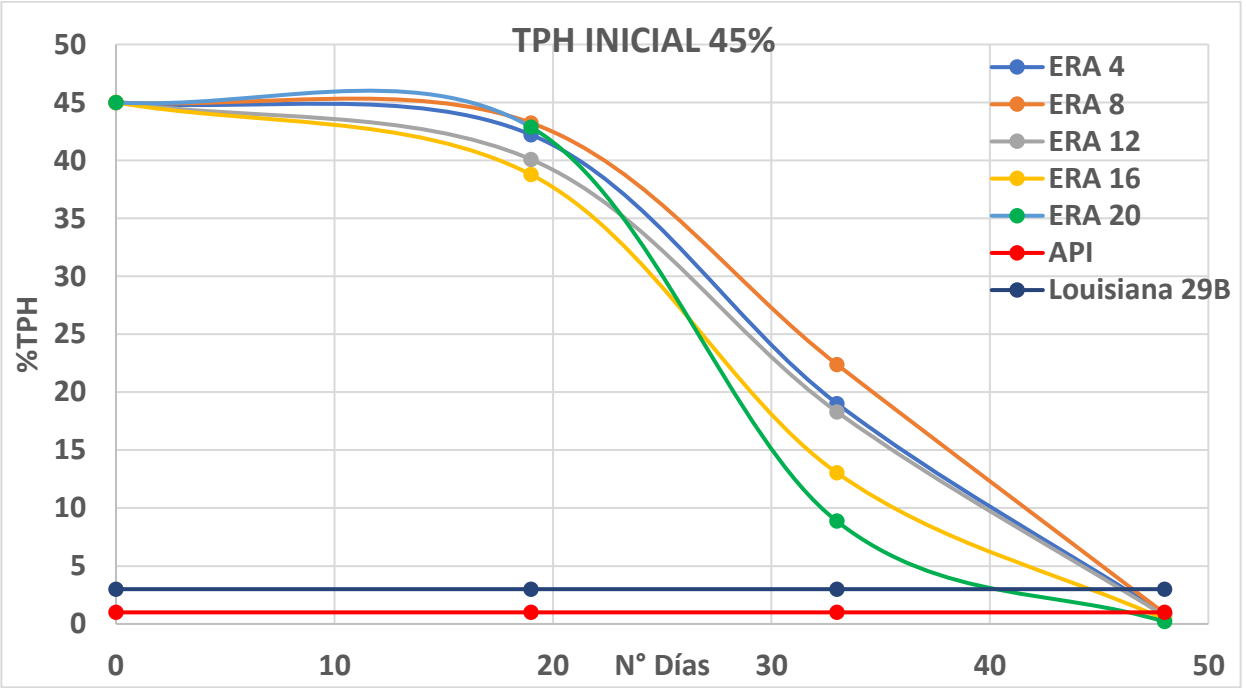
Fuente: Autores

Gráfica 3. TPH INICIAL 36% (%TPH VS TIEMPO)



Fuente: Autores

Gráfica 4. TPH INICIAL 45% (%TPH VS TIEMPO)



Fuente: Autores

Observando las gráficas anteriores se evidencia que el comportamiento de remoción de TPH varía dependiendo de la cantidad de hidrocarburo inicialmente por remover y el contenido de suelo añadido inicialmente. Como se contempla en la gráfica 1 que ilustra los porcentajes de remoción de las ERAS con TPH inicial del 9%, cuando las muestras inician con un TPH del 9% (menor cantidad de borra y mayor de suelo en comparación con todos los casos), el comportamiento del porcentaje de remoción es mucho más rápido en los primeros 19 días asimilándose a una tendencia lineal, sin embargo, después de este tiempo la variación de remoción con respecto al tiempo es mínima, mostrando una tendencia casi constante; esto representa, que el tiempo de degradación por parte de los microorganismos se vuelve mucho más lenta a medida que se ha removido la mayor parte de hidrocarburo que presenta la muestra. Por otro lado, los porcentajes de remoción para las ERAS con TPH inicial del 18%, 36% y 45% ilustrados en las gráficas 2, 3 y 4, visualizamos que la tendencia inicial de estas tiene un comportamiento diferente con respecto a la gráfica 1. Estas 3 gráficas presentan un porcentaje de remoción de TPH más lento en sus primeros 19 días, lo que indica que, a tener mayor porcentaje de borra y menor cantidad de suelo, su proceso y activación microbiana es mucho más lenta, y requiere de más tiempo para aumentar su biodisponibilidad.

Inicialmente el porcentaje de remoción de las ERAS con TPH inicial del 18%, es poco, como se ilustra en la gráfica 2, este comportamiento es similar en los porcentajes de remoción de los TPH inicial del 36% y 45%, gráficas 3 y 4 respectivamente. No obstante, después de los 19 días el comportamiento del porcentaje de remoción para las ERAS de TPH inicial del 18% se asemeja mucho más al de la gráfica 1. Desde ese día la gráfica toma una tendencia casi lineal hasta el día 33, manifestando un porcentaje de remoción mucho más eficaz durante ese lapso; a partir del día 33 la variación del porcentaje de remoción con respecto al tiempo es mínima, mostrando una tendencia casi constante, lo que ratifica que el tiempo de degradación por parte de los microorganismos se vuelve más lenta a medida que se ha removido la mayor parte de hidrocarburo que presenta la muestra. Para los porcentajes de remoción de los TPH inicial del 36% y 45%, gráficas 3 y 4 respectivamente, el escenario es diferente, estos datos presentan una tendencia muy similar en toda su trayectoria, y a diferencia de los datos obtenidos en las gráficas 1 y 2 no todas sus ERAS presentan la misma tendencia del porcentaje de remoción. Partiendo del día 19 la tendencia de las líneas que representan las ERAS con mayor relación de producto (15 y 16) y adición de abono (19 y 20), presentan un comportamiento casi lineal hasta el día 33 y partir de allí el porcentaje de remoción es inferior en la misma relación de tiempo. Aunque esto también se ve en

las gráficas 1 y 2, el comportamiento aquí es diferente, debido que a pesar de que se evidencia que el proceso es más lento, en este caso el porcentaje removido es mucho mayor, esto se puede ocurrir debido a que aún no se había removido la mayor parte de hidrocarburo presente en la muestra y a estas condiciones el proceso presenta mayor eficiencia. Para las líneas que representan las ERAS 3, 7 y 11 y las líneas que representan las ERAS 4, 8 Y 12 de las gráficas 3 y 4 respectivamente, se observa un comportamiento diferente con respecto a las demás, pues la tendencia de estas desde el día 19 hasta el último día es casi lineal, durante todo el lapso de tiempo se presenta una disminución rápida del porcentaje de TPH, lo que para este caso no se puede evidenciar que a medida que se ha removido la mayor parte de hidrocarburo el proceso es menos eficiente. En respecto a las tendencias anteriormente descritas, observadas en las gráficas, se puede intuir que llegar a un consenso de ellas es muy difícil, puesto que cada una tiene comportamientos propios de sus condiciones iniciales y son afectadas directamente por la proporción de producto que se le añade a cada ERA.

Además de analizar la tendencia que reflejan los porcentajes de remoción ilustrados en las gráficas 1, 2, 3 y 4, se analiza el comportamiento del tiempo estimado que tarda el proceso de biorremediación para llevar las muestras a condiciones legalmente optimas con el medio ambiente, siendo este un factor muy importante a la hora de tomar decisiones en futuros proyectos. Inicialmente de las 4 gráficas se observa que las muestras que menor tiempo tardaron en biorremediar son las ERAS que inicialmente contaban con menor contenido de hidrocarburos (9%), que en promedio tardan de 20 a 25 días, seguidamente se encuentran las ERAS con un TPH inicial del 18% que tardan entre 36 a 43 días en promedio, por último se encuentran las ERAS con TPH iniciales de 36 y 45%; para la primera el rango de tiempo oscila entre 44 y 48 días, mientras que para la segunda no se puede predecir un rango, todas sus muestras presentan la biorremediación al día 48. Por otra parte, los rangos de tiempo se ven establecidos por la cantidad de producto que se añade en cada muestra, en todas las gráficas de diferentes valores de TPH inicial, se observa que a mayor relación de producto adicionado es menor el tiempo de biorremediación, esto, a excepción de las muestras contaminadas inicialmente con un TPH de 45% como se mencionó anteriormente la biorremediación en estas fue evidencia en el mismo día. De lo anterior se podría decir que a mayor relación de producto es más eficaz el proceso, sin embargo, como se muestra en las gráficas la diferencia entre días es mínima.

Por último, se evalúa el aporte nutricional por parte del GODOIL al suelo tratado. Diariamente se llevó un seguimiento de las cantidades adicionadas a cada una de

las muestras, estos datos se agruparon para evidenciar la cantidad de producto total añadido a cada una de las ERAS durante los 48 días. Del valor obtenido se calculó la cantidad de GODOIL, teniendo en cuenta la relación del 70% con la que se trabaja; obtenido el valor de GODOIL añadido a cada ERA, se estima el aporte nutricional de dicha cantidad para cada una de ellas. El aporte nutricional de GODOIL se muestra en el ANEXO D Ilustración 14. ficha técnica GODOIL, donde se encuentra en brevedad cada uno de los componentes que este aporta y la cantidad aportada por litro de producto. En la Tabla 14, se muestra las cantidades de GODOIL adicionado a cada ERA, y la cantidad aportada de cada uno de los nutrientes.

Tabla 14. Aporte de nutrientes al suelo

TPH (%)	ERA	Producto (mL)	GODOIL (L)	Nitrógeno (g)	Fósforo (g)	Potasio (g)	Nitrógeno orgánico (g)	Carbono orgánico oxidable (g)
9	1	46,2	0,0323	0,3881	0,2684	0,2684	0,1106	1,8757
	5	23,1	0,0162	0,1940	0,1342	0,1342	0,0553	0,9379
	9	69,3	0,0485	0,5821	0,4026	0,4026	0,1659	2,8136
	13	92,4	0,0647	0,7762	0,5368	0,5368	0,2212	3,7514
	17	46,2	0,0323	0,3881	0,2684	0,2684	0,1106	1,8757
18	2	65,8	0,0461	0,5527	0,3823	0,3823	0,1575	2,6715
	6	32,9	0,0230	0,2764	0,1911	0,1911	0,0788	1,3357
	10	98,7	0,0691	0,8291	0,5734	0,5734	0,2363	4,0072
	14	131,6	0,0921	1,1054	0,7646	0,7646	0,3151	5,3430
	18	65,8	0,0461	0,5527	0,3823	0,3823	0,1575	2,6715
36	3	56	0,0392	0,4704	0,3254	0,3254	0,1341	2,2736
	7	28	0,0196	0,2352	0,1627	0,1627	0,0670	1,1368
	11	84	0,0588	0,7056	0,4880	0,4880	0,2011	3,4104
	15	112	0,0784	0,9408	0,6507	0,6507	0,2681	4,5472
	19	56	0,0392	0,4704	0,3254	0,3254	0,1341	2,2736
45	4	56	0,0392	0,4704	0,3254	0,3254	0,1341	2,2736
	8	28	0,0196	0,2352	0,1627	0,1627	0,0670	1,1368
	12	84	0,0588	0,7056	0,4880	0,4880	0,2011	3,4104
	16	112	0,0784	0,9408	0,6507	0,6507	0,2681	4,5472
	20	56	0,0392	0,4704	0,3254	0,3254	0,1341	2,2736

Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

Con los resultados encontrados durante el proyecto, se establece que el porcentaje de remoción de TPH del suelo contaminado con borras, utilizando como agente biorremediador GODOIL, es mayor al 99% en promedio. De acuerdo con esto se demuestra que el producto es eficiente como agente biorremediador en suelos contaminados con borras, y así, brinda solución a la gran problemática que se tiene en la industria con estos residuos en materia de disposición. Esta solución además de ser amigable con el medio ambiente por la composición natural y orgánica del producto actúa en lapsos cortos de tiempo entre los 25 y 48 días, dependiendo de la carga contaminante que se desee remover.

Además, por sus componentes se intuye que este represente un gran aporte nutricional al suelo como se muestra en la Tabla 14, lo que puede significar un valor agregado de este producto al proceso y dejar el suelo en mejores condiciones que las iniciales para su uso, sin embargo, no se puede evidenciar con certeza, debido a que no se tenía caracterizado los nutrientes del suelo inicialmente.

Por otra parte, se identifica que todas las concentraciones utilizadas son óptimas para la remoción de hidrocarburos en suelos contaminados con borras; sin embargo, se evidencia que la que mayor aporte brinda al porcentaje de remoción de TPH, es de 2.8 mL de producto diario. No obstante, la diferencia de remoción de TPH y tiempo para obtener el resultado deseado no es significativa en comparación con las que tiene una menor cantidad de producto (0.7 mL, 1.4 mL y 2.1 mL).

Esta observación también es reflejada en las muestras con adición de abono, aunque estas presentan los valores de TPH más bajos al final del proyecto, la diferencia es mínima, siendo estas del 0.18%, 0.08%, 0.29% y 0.66% para las muestras con TPH's iniciales del 9%, 18%, 36% y 45 % respectivamente. Por lo anterior, se intuye que económicamente no es viable añadir abono, ni utilizar altas concentraciones de producto, para este caso cantidades de 2.1 mL y 2.8 mL diario.

Por último, se establece que por la eficiencia del producto es posible llevar suelos con concentraciones de 45% de TPH a los valores establecidos permisibles por la norma internacional Louisiana 29B y la norma establecida por API.

RECOMENDACIONES

- Realizar las pruebas de determinación de TPH en lapsos de tiempo más cortos para visualizar un comportamiento más detallado de la tendencia del porcentaje de remoción de hidrocarburos a través del tiempo.
- Llevar a cabo este estudio a condiciones ambientales para tener un resultado más representativo, (planta piloto).
- Establecer diferentes relaciones de producto a las aplicadas, para evidenciar si existe diferencias representativas en el porcentaje de remoción de TPH y del tiempo en que se tarda en el proceso.
- Añadir a algunas de las muestras el abono CEAGRODEX desde el primer día para evidenciar o no un mayor efecto en la remoción de hidrocarburos.
- Poner las muestras en el baño maría a una temperatura superior (75°C) a la temperatura de ebullición del cloroformo.
- Manejar adecuadamente los recipientes donde se almacena el cloroformo con hidrocarburo, preferiblemente no tocar sin guantes, ya que se puede aportar partículas que interfieren en el peso de estos.
- Para un próximo estudio realizar una caracterización completa del suelo (microorganismos y nutrientes presentes) antes y después del proceso para realizar una mejor comparación.
- Llevar a cabo el proyecto con diferentes suelos y diferente actividad microbiana.

BIBLIOGRAFÍA

- ATSDR. (1999). Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades. Retrieved from Hidrocarburos totales de petróleo: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.pdf
- Benavides, J. (2006). Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. p. 8.
- Bermeo, C., & Pérez, L. (2017). Variación porcentual de los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en suelos contaminados mediante el uso de abono 100% orgánico. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Castillo, P. (2009). Aplicación de la técnica de Landfarming para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Piura: Universidad de Piura.
- Dible, J., & Bartha, R. (1979). Effect of environment parameters on the biodegradation of oil sludge. Applied environment microbiology.
- Gómez, L. J., & Gómez, M. P. (2015). Métodos utilizados para el tratamiento de las borras de tanques de almacenamiento en la industria del petróleo. Cali: Universidad San Buenaventura Cali.
- Haritash, A., & Kaushik, C. (2009, September 30). Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). Journal of Hazardous Materials. University of Delhi, 169, p. 15. doi:doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137
- INTAGRI. (2017). Propiedades físicas del suelo y el crecimiento de las plantas. INTAGRI, Suelos(29), 5 p.
- Maroto, M. E., & Rogel, J. M. (2002). Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. GEOCISA, p. 9.
- Martin, A. (1991). Introduction to Soil Microbiology. Miami: Krieger Publishing Company.
- Méndez, M., Rennola, L., & Peña, M. &. (2011). Determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) usando CG-FID en suelos de un patio de tanques en desuso situado en Catia La Mar- Venezuela. Ciencia e Ingeniería, p. 37.
- Ministerio de ambiente. (2005, Diciembre 30). Ideam. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/>
- Ministerio de Ambiente, V. y. (2005). Política Ambiental Para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. Bogotá: Panamericana formas e impresos.

- Ministerio del medio ambiente. (n.d.). Minambiente. Retrieved from Normativa de residuos o desechos peligrosos: <http://quimicos.minambiente.gov.co>
- Petrobras. (2017). Eliminación de la borra de petróleo. Magazine.
- PONCE, D. S. (2014). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Concepción: Universidad del Bio Bio .
- Ponce, D. S. (2014). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos . Concepción : Universidad del Bio-Bio.
- Ramírez, R. (1997). Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Bogotá: FENALCE - SENA.
- Razo, D. I. (2003). Biorremediación de suelos contaminados con fenol. In CAPÍTULO 3. Puebla: Catarina, Universidad de las Américas Puebla.
- Riojas, H. (2010, Diciembre 9). Efectos de los surfactantes en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Química Viva, p. 26.
- Romero, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.
- Rosero, D., Reyes, C., & Pinzón, K. (2016). Descripción de un área de suelos degradada. Manizales: Universidad de Manizales.
- Sánchez, J., & Sanabria, J. (2009, Junio 30). Metabolismos microbianos involucrados en procesos avanzados para la remoción de nitrógeno, una revisión prospectiva. Colombiana de Biotecnología, 11(1).
- Sánchez, O., & Velásquez, A. (2018). Evaluación Técnico-Económica para área landfarming contaminada con un crudo liviano, usando abono 100% orgánico de la empresa CEAGRODEX. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- SOLANCO. (n.d.). GRUPO EMPRESARIAL SOLANCO S.A. (Tatiana Solano Caballero) Retrieved from <http://www.solanco.co/contactenos-contact-us.html>
- Solano, T. (2014). Caracol Gemelas fantásticas. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=JDAuKujb-DI>
- Súarez, L. M. (2011). Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Sudip, K. S. (2002, April 9). Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation. TRENDS in Biotechnology, p. 6.

- Tecnicoagrícola. (2013). Tecnicoagrícola. Retrieved 03 30, 2019, from <http://www.tecnicoagricola.es/ph-de-un-suelo/>
- Torres, K., & Zuluaga, T. (2009). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Vidales, H. (2008). Método para la fludización de borras y recuperación de hidrocarburos de tanques de almacenamiento de hidrocarburos . Bogotá D.C.

ANEXO A

PRUEBAS AL SUELO

Color. El color es una de las características morfológicas más importantes, la más obvia, fácil de determinar y relevante en la identificación taxonómica de los suelos. El color de los suelos guarda una estrecha relación con los componentes sólidos (materia orgánica, textura, composición mineralógica, morfología), siendo los metales de transición principalmente, los que pueden dotar a los suelos esta característica particular.

Tabla 15. Relación color - propiedades del suelo

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 hierro no hidratados.
Amarillo	Es un indicativo de drenaje. El color se debe a la presencia de óxidos de hierros no hidratados.
Pardos	Denota presencia de óxidos de hierro en adición a la materia orgánica.
Grisés	Su color se debe a la presencia de fracciones minerales. 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.

Fuente: Bermeo & Pérez, 2016

El sistema de Notación Munsell y CIELab, son dos técnicas que permiten la determinación del color del suelo. Para el presente caso se usó la Carta Munsell, la cual comprende variables como:

- 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.

Ilustración 11. Carta Munsell



Fuente: Autores

Procedimiento:

- Determine el estado de humedad del suelo: seco, húmedo o mojado y anótelos. El suelo al estar seco es compacto, duro, no se adhiere y no mancha los dedos; por el contrario, 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 estará en el rango de mojado, sino en el de húmedo.
- Coloque el suelo detrás de los círculos (agujeros) presentes en la tabla Munsell y compare el color con los patrones, hasta encontrar el más aproximado.
- Anote el color valiéndose de la nomenclatura de la tabla, anotando primero el matiz, seguidamente el valor (números localizados sobre la parte izquierda vertical) como numerador, y el chroma (localizado en la parte inferior de la tabla), como denominador.
- Anote el equivalente de la clave observando el reverso de la hoja anterior identificada en la misma clave. Queda así definido el color codificado.

MUNSELL® SOIL COLOR CHART

VALUE

8/

7/

6/

5/

4/

3/

2/

Tabla 16. Clasificación de suelos según su CE, pH y sodio intercambiable

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

Fuente: Fernández, 2006

Material y equipo

- Muestra de suelo seco y molido en un mortero.
- Balanza analítica.
- Vaso de precipitado de 100 mL.
- Bureta.
- Papel filtro.
- Conductímetro.
- Frascos.
- Agua destilada.

Procedimiento

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

Ilustración 13. Conductímetro y potenciómetro



Fuente: Autores

Densidad. 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 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 esta 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.

- 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 del picnómetro

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

Procedimiento:

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

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 capilaridad. La interacción de estas fuerzas se conoce como succión del suelo o tensión de humedad del suelo.

Materiales

- Cápsulas para humedad
- Balanza analítica
- Estufa para secado (horno)
- Espátula.
- Suelo

Procedimiento

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

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

En donde:

W_{sh} = Peso suelo húmedo

W_{ss} = Peso suelo seco

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

Materiales y equipo

- Muestra de suelo
- Balanza analítica
- Vasos de precipitado de 50 mL
- Pipeta de 10 mL
- Pipeta con agua destilada
- Potenciómetro
- Agua destilada
- Soluciones amortiguadoras de pH 7 y 4
- Agitadores magnéticos

Procedimiento

- Pesar 20 gr 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

Porosidad. La porosidad constituye una de las características más importantes al definir el valor ecológico de los suelos. En estudios de caracterización física del suelo, es conveniente determinar la porosidad de aireación.

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

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

Pt = Porosidad total

Da = Densidad aparente

Dr = Densidad real

ANEXO B

DETERMINACION DE LA GRAVEDAD API Y LA GRAVEDAD ESPECIFICA DEL PETROLEO CRUDO Y DERIVADOS DEL PETROLEO (METODO DEL TERMOHIDROMETRO) NORMA ASTM D 287-82

Esta prueba se realiza con el objetivo de determinar la gravedad API de la borra por medio del hidrómetro y gravedad específica con la utilización del gravímetro, con el fin de conocer la calidad de la borra, la cual representa el peso y complejidad.

Materiales y equipos

- Hidrómetros o termohidrómetros
- Termómetros
- Probetas de tamaño apropiado (1000 ml)
- Gravímetro
- Borra de petróleo

Procedimiento

1. Se adiciona la borra en una probeta de 1000 ml totalmente limpia; sin salpicar, evitando la formación de burbujas de aire. Remover las burbujas de aire formadas con la ayuda de un papel filtro limpio.
2. Puesta la muestra en el cilindro en una posición vertical en un lugar libre de corrientes de aire, se garantiza que la temperatura de la muestra no cambie considerablemente de temperatura durante el tiempo de la prueba, esto, con la ayuda de un termómetro.
3. Seguido se introduce suavemente el termohidrometro en la muestra, evitando humedecer la base por encima del nivel de inmersión. Continuamente se realizan registros de temperatura, hasta que esta última sea constante.
4. Una vez el termohidrometro se encuentre completamente en reposo, flotando libremente alejado de la pared del cilindro y la temperatura de la muestra sea constante, se realiza la lectura.
5. De la misma manera descrita el procedimiento anterior se realiza la medición de la gravedad específica 60°F/60°F, por medio del gravímetro el cual esta estandarizado para da dicha medición a condiciones estándar.

6. Se reporta los datos de la gravedad específica y la gravedad API tanto la temperatura de laboratorio como a la corregida.

Tabla 17. Resultados prueba gravedad °API y gravedad específica

Método directo		Método indirecto	
TERMO – HIDROMETRO		GRAVIMETRO	
T _x °F	°API _{T_x}	T _x °F	G _{T_x}
89.6	11.6	89.6	0.93

CORRECCIÓN GRAVEDAD °API POR TABLAS

La tabla a utilizar para este fin es la #5 de la ASTM.

1. Se entra en la tabla en la columna de gravedad API a la temperatura observada (89.6°F) y se busca el valor de gravedad API obtenido (11.6 °API).
2. Seguido se proyectan las dos columnas y se lee la gravedad API correspondiente. Para este caso no se tiene el valor exacto de la gravedad API obtenida en la prueba, por ende, se debe realizar una interpolación simple de los valores leídos en la tabla.

Tabla 18. Lecturas tabla #5 ASTM

°API (T _x)	° API	T _x (°F)
11.5	10.1	89.6
12	10.6	

Fuente: Autores

Por interpolación de la gravedad °API entre los valores de la tabla anterior, se obtiene que la gravedad °API_{60°F} = 10.2. Con este valor se calcula la gravedad específica y se realiza corrección por contenido de agua como se muestra a continuación.

- Gravedad específica (G_m)

$$G_m = \frac{141.5}{API + 131.5}$$

$$G_m = \frac{141.5}{10.2 + 131.5} = 0.9986$$

- Corrección gravedad específica por contenido de agua (Ge)

$$Ge = \frac{Ge_m - Ge_w * BW}{(1 - BW)}$$

Ge_w = gravedad específica del agua

BW = Porcentaje agua en la muestra

$$Ge = \frac{0.9986 - 1 * 0.125}{(1 - 0.125)} = 0.9984$$

- Gravedad API corrección por contenido de agua

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{Ge} - 131.5 = \frac{141.5}{0.9984} - 131.5 = 10.23$$

**DETERMINACION DE CONTENIDO DE AGUA Y SEDIMENTOS EN EL
PETROLEO CRUDO POR EL METODO DE LA CENTRIFUGA
ASTM D 96 - 88**

Esta prueba es realizada con el objetivo de determinar el contenido de agua y sedimentos en la borra por medio de la centrifuga.

Materiales y equipos

- Centrifuga
- Tubos para centrifuga
- Baños de temperatura
- Solventes (tolueno)
- Desemulsificante

Procedimiento

1. Se marca cada uno de los tubos para centrifuga con un número o letra determinada, en este caso se toma las letras A, B, C, Y D. Se llenan cada uno de los tubos de centrifuga hasta la marca de 50 mL con muestra de borra, seguido con una pipeta se llena cada tubo con solvente (tolueno) hasta los 100 mL, finalmente con la ayuda de una pipeta se adiciona 0.2 ml de desemulsificante (rompedor). Se tapan los tubos apretadamente y se invierten diez veces hasta que la borra y el solvente están uniformemente mezclados.
2. Se aflojan los tapones de los tubos ligeramente y se sumergen los tubos en el baño maría por un tiempo de 15 minutos a una temperatura de 80 °C, leída con la ayuda de un termómetro.
3. Luego, se trasladan e instalan los tubos en las copas contenedoras en lados opuestos de la centrifuga para establecer una condición de balance. Se aprietan los tapones y se hace girar la centrifuga por un tiempo de 15 minutos a 1800 RPM y velocidad de 600.
4. Terminado el proceso de centrifuga, se retiran los tubos y se procede a tomar la temperatura con el termómetro. Finalmente se lee y registran los resultados obtenidos (sedimentos, agua y crudo). Nuevamente se calientan los tubos en el baño maría (sin agitar en este caso), se regresan a la centrifuga y se hacen girar por 15 minutos a las mismas condiciones mencionadas anteriormente. Se repite esta operación hasta que el volumen de agua, sedimentos y crudo permanece

constante en dos lecturas consistentes consecutivas. Para este caso se requirió realizar el procedimiento 4 veces.

Tabla 19. Resultados prueba BSW

Etapa	Lectura (mL)	Tubo			
		A	B	C	D
1	Crudo	28	30	27	28
	Agua	0	0	0	0
	Solidos	22	20	23	22
2	Crudo	21	26	28	23
	Agua	7	4	2	5
	Solidos	22	20	20	22
3	Crudo	23	24	24	24
	Agua	7	6	6	6
	Solidos	20	20	20	20
4	Crudo	23	24	24	24
	Agua	7	6	6	6
	Solidos	20	20	20	20

Fuente: Autores

Muestra de cálculos

- %BSW

$$\text{promedio S\&W} = \frac{27 + 26 + 26 + 26}{4} = 26.25 \text{ ml}$$

$$\%BSW = \frac{\text{mL Promedio S\&W}}{\text{Total mL muestra}} * 100$$

$$\%BSW = \frac{26.25 \text{ mL}}{50 \text{ mL}} * 100 = 52.50 \%$$

- Contenido de agua (%W)

$$\text{promedio Water} = \frac{7 + 6 + 6 + 6}{4} = 6.25 \text{ ml}$$

$$\%W = \frac{\text{mL Promedio W}}{\text{Total mL muestra}} * 100$$

$$\%W = \frac{6.25 \text{ mL}}{50 \text{ mL}} * 100 = 12.5 \%$$

- Contenido de solidos (%S)

$$\%S = \%BSW - \%W$$

$$\%S = 52.5\% - 12.5\% = 40\%$$

- Contenido de hidrocarburo

$$\%Hidrocarburo = 100\% - \%BSW$$

$$\%Hidrocarburo = 47.5 \%$$

METODO PATRON DE ANALISIS PARA VISCOSIDAD SAYBOLT ASTM D 92-90

Esta prueba es realizada para determina la viscosidad Saybolt furol y Saybolt universal de la borra a una temperatura entre 70 y 120 °F, que se basan en la medida de tiempo de flujo de 60 mL de muestra a través de un orificio calibrado.

Materiales y equipos

- Viscosímetro Saybolt
- Baño de viscosidad Saybolt
- Tuno de salida
- Soporte del termómetro
- Termómetro para viscosidad Saybolt
- Termómetros de baño
- Filtros de embudo
- Frasco recibidor
- Cronometro

Procedimiento

1. Se inicia preparando el equipo de viscosidad para realizar el precalentamiento.
2. Se instala el tapón en el equipo antes de adicionar la borra, evitando escapes de esta misma, seguido se adiciona la muestra en el recipiente furol, hasta obtener la temperatura de inicio de la prueba 100 °F (seguido de 122 °F, 130 °F y 150°F)
3. Una vez se encuentran en estas temperaturas, se floja el tapón y con la ayuda de un cronometro se calcula el tiempo que tarda en caer el flujo en el frasco recibidor hasta llegar al nivel de la marca de este último.
4. Se debe tener presente que para determinar la viscosidad Saybolt furol (viscosidades medias) el tiempo debe ser mayor de 25 segundos.

Tabla 20. Resultados Prueba Viscosidad SSF

Tx (°F)	SSF (segundos)
100	53.20
122	35.51
130	33.93
150	22.81

Fuente: Autores

Como el tiempo obtenido para la temperatura de 150 °F es menor a los 25 segundos, se toma como inválido este resultado. Con la densidad del agua y la gravedad específica del aceite a las temperaturas que se realizaron la pruebas se obtiene la densidad del aceite a cada una de ellas

$$\rho_{o(Tx)} \left(\frac{lb}{gal} \right) = \rho_{w(Tx)} \left(\frac{lb}{gal} \right) * Ge_{o(Tx)}$$

Tabla 21. Densidad de aceite a Tx

$\rho_{w(Tx)} \left(\frac{lb}{gal} \right)$	$Ge_{o(Tx)}$	$\rho_{o(Tx)} \left(\frac{Lb}{gal} \right)$
8.2879	0.9837	8.1530
8.2461	0.9757	8.0453
8.2285	0.9727	8.0040
8.1803	0.9654	7.8972

Fuente: Autores

Seguido de esto, se realiza un proceso de iteración por Newton Raphson para determinar la viscosidad a cada una de las temperaturas utilizando tanto la densidad del aceite como la lectura de viscosidad segundos Saybolt furol, obteniendo como valores finales.

Tabla 22. Viscosidades Reales

Tx (°F)	Viscosidad real (cSt)
100	113.77
122	70.87
130	70.58

Fuente: Autores

Con los resultados anteriores se confirma la relación en que, a mayor temperatura, la viscosidad de la muestra disminuye.

DETERMINACION DE LA SAL EN EL CRUDO POR EL METODO DEL POTENCIOMETRO ASTM D 3230 -87

Se determina la cantidad de sal en la borra, por medio de un potenciómetro de una manera eficiente y práctica, para su veracidad.

Materiales y equipos

- Probeta
- Potenciómetro
- Baker
- Termómetros
- Reactivos

Procedimiento

1. Se inicia con la calibración del equipo con el blanco de reactivos, conectando el potenciómetro a una salida de 110 voltios, cambiando el botón de calibración a la posición "HIGH", llevando el interruptor de la parte superior delante del equipo a la posición "CALIBRATED", sosteniendo el interruptor en esa posición ajuste el voltaje a 125 voltios, seguido sin dejar de sostener el botón "CALIBRATED", ajuste el botón que se encuentra en la parte izquierda a la lectura de 0.1 mA. Una vez establecida la lectura suelte el interruptor. Mueva el botón de calibración a la posición "LOW", lleve el interruptor de la parte inferior delantera delante del equipo a la posición "CALIBRATED", seguido y teniendo sostenido el interruptor en esa posición, se ajusta con el botón colocado en la parte derecha a la lectura de 1.0 mA. Esto calibración con el fin de chequear el voltaje el cual debe fijarse en una lectura de 125 voltios.
2. Se procede con la realización de la prueba. Se toma 7 ml de borra, y 7 ml de xileno en una probeta, se pasa el contenido de la probeta a un beaker y se enjuaga la probeta con 56 ml de xileno
3. Tapar la probeta y agitar por 1 minuto.
4. Finalmente se diluye la mezcla con 70 ml de mezcla de solventes (mezcla de sales) y se agita por un tiempo de 30 segundos. Dejar reposar por 5 minutos.

5. Tomar 100 de los 140 mL de solución preparada y se llevan al beaker de prueba. Una vez adicionada la muestra dentro del vaso para efectuar la prueba, se colocan los electrodos dentro del vaso.
6. Llevar el botón de calibración a la posición “HIGH”, seguido se lleva el interruptor a la posición “READ”, finalmente se registra la lectura que se presenta en el tablero.

Las lecturas registradas fueron tomadas a 125 voltios. Además, todos los valores registrados a continuación, son para la preparación de 100 ml de cada muestra.

Tabla 23. Composición del blanco de reactivos

Reactivo	Volumen (ml)
Mezcla de solvente	70
Xileno	56
Aceite neutro	14

Fuente: Autores

Tabla 24. Composición de la muestra de la borra

Reactivo	Volumen (ml)
Borra	7
Xileno	63
Mezcla de solvente	70

Fuente: Autores

Tabla 25. Resultados de las lecturas realizadas

SUSTANCIAS	INTENSIDAD (mA)
Blanco de reactivos	0.0213
Muestra (borra)	0.0562

Fuente: Autores

Tabla 26. Resultado de la prueba de salinidad de la borra

Ic (mA)	0.54
S ₁₂₅ v gráfico (PTB)	5.5

Fuente: Autores

ANEXO C

MÉTODO GRAVIMÉTRICO MODIFICADO (EXTRACCIÓN CON SOLVENTE)

Para lograr determinar TPH (Hidrocarburos Totales de Petr6leos) en este proyecto, se realiza una adecuada modificaci6n del m6todo del grav6metro que se encuentra estandarizado seg6n la norma US EPA 821- B94 – 004, 1995.

Materiales y equipos

- Montaje de calentamiento de tipo “Baño de Mar6a”
- Embudo de decantaci6n
- Balanza
- C6mara de extracci6n de gases y vapores org6nicos
- Manta de calentamiento/estufa
- Term6metro
- Filtros
- C6psulas de vidrio
- Probetas de diferentes vol6menes
- Vasos de precipitado de diferentes vol6menes
- Agitador

Elementos y reactivos

- Muestra de suelo contaminado
- Cloroformo
- Agua destilada

Procedimiento

- Se agrega 1 gramo de suelo contaminado a una c6psula de porcelana y se pesa en una balanza.
- Se diluye el gramo de suelo en 100 mL de agua a 40°C aproximadamente, agitando constantemente hasta obtener la diluci6n 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 a6n no se desprenden los hidrocarburos del suelo se agregan otros 10 mL de cloroformo hasta encontrar la concentraci6n 6ptima.

- Se vierte la fase líquida de la mezcla en el embudo de decantación mientras se observa la separación de la fase aceitosa y la fase acuosa. El residuo sólido se separa para su posterior proceso de filtrado.
- Teniendo la mezcla en el embudo de decantación y después de agitar vigorosamente se extrae la fase aceitosa en un vaso de precipitado y se elimina el residuo de la fase acuosa.
- Se realiza un montaje para realizar el proceso de filtración empleando un filtro, éste se dispone sobre un vaso de precipitado sujetándolo con una liga o cuerda y se procede a pasar el residuo sólido junto con el residuo líquido (fase aceitosa) obtenido en el procedimiento anterior, dejándola pasar por completo y de forma natural sin acelerar el proceso; mientras el suelo se está filtrando se le agregan de 5 a 10 mL de cloroformo con el fin de lavar por completo el suelo filtrado y extraer hasta la última gota de hidrocarburo presente en él.
- Se desecha el suelo ya limpio que queda sobre la tela de filtrado y se observa una iridiscencia presente en la fase acuosa obtenida del filtrado, por lo que
- es necesario volver a decantar en el embudo y agregar agua destilada hasta lavar la disolución y lograr que se estabilicen las fases (aceitosa/acuosa). Por último, se extrae la fase aceitosa del embudo de decantación y se almacena en una cápsula de vidrio o porcelana.
- Se coloca la solución aceitosa que se encuentra en la cápsula de vidrio en el conjunto de baño de maría para eliminar (evaporar) el cloroformo aun presente y separar por completo el hidrocarburo contenido.
- Conociendo los pesos y volúmenes empleados de solvente y el volumen final de la mezcla se puede determinar la cantidad de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) presentes en el suelo.

ANEXO D
FICHAS TÉCNICAS GODOIL Y ABONO

Ilustración 14. Ficha técnica GODOIL



Godoil
COMPOSICIÓN QUÍMICA

COMPONENTE	APORTE
NITRÓGENO	12 g/l
FOSFORO	8,3 g/l
POTASIO	8,3 g/l
NITRÓGENO ORGÁNICO	3,42 g/l
CARBONO ORGÁNICO OXIDABLE	58,8 g/l

Contenido neto: 1 litro

Fabricado, Importado y Distribuido por:

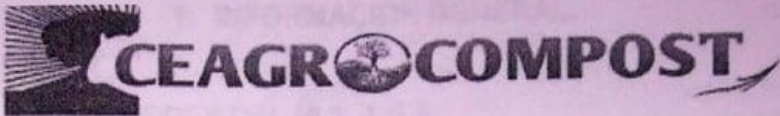
 **SOLANCO**

Zona Industrial Sur Neiva (H) Tel: (57) 8 - 8630702



Fuente: Autores

Ilustración 15. Ficha técnica abono orgánico empresa CEAGRODEX



**FERTILIZANTE ORGANICO PARA
APLICACIÓN AL SUELO DE USO
AGRICOLA**



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

CEAGROCOMPOST

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



Fuente: Sánchez y Velásquez, 2018

ANEXO E

FICHAS DE SEGURIDAD REACTIVOS

Ilustración 16. Ficha de seguridad TOLUENO

TOLUENO		ICSC: 0078	
 TOLUENO Metilbenceno Fenilmetanol Toluol $C_6H_5CH_3/C_7H_8$ Masa molecular: 92.1  Nº CAS 108-88-3 Nº RTECS XS5250000 Nº ICSC 0078 Nº NU 1294 Nº CE 601-021-00-3 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION		¡HIGIENE Estricta! ¡EVITAR LA EXPOSICION DE MUJERES (EMBARAZADAS)! ¡	
• INHALACION	Vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, náuseas, pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
• PIEL	Piel seca, enrojecimiento.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón y proporcionar asistencia médica.
• OJOS	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad o pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	Dolor abdominal, sensación de quemazón (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, dar a beber una papilla de carbón activado y agua, NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.

TOLUENO

ICSC: 0078

DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes.	símbolo F símbolo Xn R: 11-20 S: (2-)16-25-29-33 Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II CE: 
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			
ICSC: 0078		Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994	
D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro, de olor característico.		VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.		RIESGO DE INHALACION Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.
	PELIGROS QUIMICOS Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión.		EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La exposición podría causar depresión del sistema nervioso central. La exposición a altas concentraciones puede producir arritmia cardíaca, pérdida del conocimiento y muerte.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV (como TWA): 50 ppm; 188 mg/m³ (piel) (ACGIH 1995-1996). MAK: 50 ppm; 190 mg/m³ (1996).		EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central, dando lugar a desórdenes psicológicos y dificultad en el aprendizaje. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.
	DATOS AMBIENTALES		
NOTAS			
Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-31 Código NFPA: H 2; F 3; R 0;			
NOTA LEGAL IMPORTANTE:		Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).	

Fuente: International Programme on Chemical Safety

Ilustración 17. Ficha de seguridad XILENO

o-XILENO			ICSC: 0084 Marzo 2002
CAS: RTECS: NU: CE Índice Anexo I: CE / EINECS:	95-47-6 ZE2450000 1307 601-022-00-9 202-422-2	orto-Xileno 1,2-Dimetilbenceno o-Xilol $C_8H_4(CH_3)_2$ / C_8H_{10} Masa molecular: 106.2	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Polvo, agua pulverizada, espuma, dióxido de carbono,
EXPLOSIÓN	Por encima de 32°C pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire.	Por encima de 32°C, sistema cerrado, ventilación y equipo eléctrico a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra).	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡HIGIENE Estricta! EVITAR LA EXPOSICIÓN DE MUJERES (EMBARAZADAS)!	
Inhalación	Vértigo. Somnolencia. Dolor de cabeza. Náuseas.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Piel seca. Enrojecimiento.	Guantes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas de protección de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Sensación de quemazón. Dolor abdominal (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. (Protección personal complementaria: Filtro respiratorio para vapores orgánicos y gases).		Clasificación UE Símbolo: Xn R: 10-20/21-38 S: (2-)25 Nota: C Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: III	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1307-III Código NFPA: H 2; F 3; R 0;		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes y ácidos fuertes.	
IPCS International Programme on Chemical Safety  Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005			

o-XILENO		ICSC: 0084
DATOS IMPORTANTES		
ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido incoloro, de olor característico.		VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.
PELIGROS FÍSICOS Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.		RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante lentamente una concentración nociva en el aire.
PELIGROS QUÍMICOS Reacciona con ácidos fuertes y oxidantes fuertes.		EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos y la piel. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química.
LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 100 ppm como TWA; 150 ppm como STEL; A4; BEI establecido (ACGIH 2001). UE OEL: 50 ppm como TWA; 100 ppm como STEL (piel) (EU 2000).		EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La exposición a esta sustancia puede potenciar el daño auditivo causado por la exposición a ruido. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.
PROPIEDADES FÍSICAS		
Punto de ebullición: 144°C Punto de fusión: -25°C Densidad relativa (agua = 1): 0,88 Solubilidad en agua: ninguna Presión de vapor, kPa a 20°C: 0,7 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3,7		Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,02 Punto de inflamación: 32°C c.c. Temperatura de autoignición: 463°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 0,9-6,7 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 3,12
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos.		
NOTAS		
Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Aplicar también las recomendaciones de esta ficha a xileno de grado técnico. Consultar también la ficha FISQ 0086 p-Xileno y FISQ 0085 m-Xileno. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en enero de 2008: ver Límites de exposición.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
Límites de exposición profesional (INSHT 2014): VLA-ED: 50 ppm; 221 mg/m ³ VLA-EC: 100 ppm; 442 mg/m ³ Notas: vía dérmica. VLB: 1 g/g creatinina en orina de ácidos metilhipúricos.		

Fuente: International Programme on Chemical Safety

Ilustración 18. Ficha de seguridad CLOROFORMO

CLOROFORMO			ICSC: 0027 Abril 2000
CAS: 67-66-3 RTECS: FS9100000 NU: 1888 CE Índice Anexo I: 602-006-00-4 CE / EINECS: 200-663-8		Triclorometano Tricloruro de metilo Tricloruro de formilo CHCl_3 Masa molecular: 119.4	
			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible. Véanse Notas. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes.		En caso de incendio en el entorno: usar agente de extinción adecuado.
EXPLOSIÓN			En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		HIGIENE Estricta EVITAR LA EXPOSICIÓN DE ADOLESCENTES Y NIÑOS	
Inhalación	Tos. Vértigo. Somnolencia. Dolor de cabeza. Náuseas. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Enrojecimiento. Dolor. Piel seca.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal. Vómitos. (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Dar a beber agua abundante. Reposo. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).		Envase irrompible; colocar el envase frágil dentro de un recipiente irrompible cerrado. No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: Xn R: 22-38-40-48/20/22 S: (2-)36/37 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 6.1 Grupo de Envasado NU: III	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-61S1888 Código NFPA: H 2; F 0; R 0;		Separado de alimentos y piensos y materiales incompatibles (Véanse Peligros Químicos). Ventilación a ras del suelo.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005 IPCS International Programme on Chemical Safety      			

CLOROFORMO		ICSC: 0027
DATOS IMPORTANTES		
ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido incoloro volátil, de olor característico.		VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación a través de la piel y por ingestión.
PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire.		RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.
PELIGROS QUÍMICOS En contacto con superficies calientes o con llamas esta sustancia se descompone formando humos tóxicos y corrosivos (cloruro de hidrógeno ICSC0163, fosgeno ICSC0007 y vapores de cloro ICSC0126). Reacciona violentamente con bases fuertes, oxidantes fuertes, algunos metales, como aluminio, magnesio y zinc, originando peligro de incendio y explosión. Ataca plástico, caucho y revestimientos.		EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, hígado y riñón. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata. Se recomienda vigilancia médica.
LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV (como TWA): 10 ppm; A3 (ACGIH 2004). MAK: 0.5 ppm; 2.5 mg/m ³ ; Carcinógeno categoría 4, H (absorción dérmica), Categoría de limitación de pico: II(2), Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2004).		EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al hígado y al riñón. Esta sustancia es posiblemente carcinógena para los seres humanos.
PROPIEDADES FÍSICAS		
Punto de ebullición: 62°C Punto de fusión: -64°C Densidad relativa (agua = 1): 1,48 Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 0,8 Presión de vapor, kPa a 20°C: 21,2 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 4,12		Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,7 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 1,97
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos.		
NOTAS		
Se puede volver combustible por la adición de pequeñas cantidades de una sustancia inflamable o por el aumento del contenido de oxígeno en el aire. El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. La alerta por el olor es insuficiente. NO utilizar cerca de un fuego, una superficie caliente o mientras se trabaja en soldadura. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en abril de 2005: ver Límites de exposición.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
Límites de exposición profesional (INSHT 2011): VLA-ED: 2 ppm; 10 mg/m ³ Notas: vía dérmica. Esta sustancia tiene establecidas restricciones a la fabricación, comercialización o al uso especificadas en el Reglamento REACH. Agente químico que tiene establecido un valor límite indicativo por la UE.		

Fuente: International Programme on Chemical Safety