

**EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL SURFACTANTE
TRITON X-100 EN LA REMEDIACIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO
CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS A ESCALA LABORATORIO,
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE REMEDIACIÓN LAVADO DE SUELO.**

ESTUDIANTE

WILMAR ALFREDO HERNÁNDEZ LÓPEZ

ID. 000085218

UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2012

**EFFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL SURFACTANTE
TRITON X-100 EN LA REMEDIACIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO
CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS A ESCALA LABORATORIO,
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE REMEDIACIÓN LAVADO DE SUELO.**

ESTUDIANTE

WILMAR ALFREDO HERNÁNDEZ LÓPEZ

ID. 000085218

PROYECTO DE GRADO

DIRECTORA DEL TRABAJO DE GRADO

M.Sc. ANGÉLICA MARÍA MUSKUS MORALES

UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2011

TITULO A OBTENER:
INGENIERO AMBIENTAL

FECHA DE ENTREGA:

27 de Marzo de 2012

Nota de aceptación

Firma del Director

Firma de Jurado

Firma de Jurado

AGRADECIMIENTOS

En la elaboración de este proyecto de grado han participado personas e instituciones a las que quiero agradecer de forma sincera por el apoyo, la colaboración y confianza que me han demostrado.

A mi madre, Ruth Del Socorro López López quien día a día me apoya y da ánimo para sacar adelante lo que me propongo, gracias por estar siempre a mi lado.

A mi padre, José Presentacion Hernandez B. quien me da fuerzas y excelentes consejos para nunca desfallecer en el camino, gracias por ser un ejemplo a seguir.

A mi hermano, Edson Boniek Hernandez L. quien con sus palabras de ánimo y admiración me llena de alegría y porque más que un hermano eres un cómplice.

A la Ing. Angélica María Muskus M. por su paciencia, colaboración y su buena energía en todo este proceso. La mejor profe de ambiental.

A mis amigos, en especial a Diana Carolina García Ardila, que mas que una compañera de proyecto, fue una excelente amiga y en muchos casos mi memoria. Gracias por aguantarme dianita.

Al Ing. Luis Eduardo Castillo Mesa, a la Universidad Pontificia Bolivariana y al Instituto Colombiano de Petróleos, por ésta oportunidad con la cual puedo alcanzar mi título profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
2. MARCO TEORICO.....	21
2.1 SUELO.....	21
2.2 FORMACIÓN Y PRINCIPALES CARACTERISTICAS DEL SUELO.....	21
2.3 PERFILES DEL SUELO.....	22
2.4 SUELO COMO SISTEMA DE TRES FASES.	23
2.5 PROPIEDADES DEL SUELO.	24
2.5.1 Contenido de materia orgánica.....	25
2.5.2 Contenido de humedad.....	26
2.5.3 Permeabilidad e infiltración.....	26
2.5.4 Porosidad.	27
2.5.5 Textura.	28
2.5.6 Capacidad de intercambio catiónico.	29
2.5.7 Contenido de nutrientes.....	30
2.5.8 pH.....	31
2.5.9 Conductividad hidráulica.....	32
2.5.10 Densidad real y aparente.....	33
2.6 SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS.....	34
2.7 PROBLEMÁTICA EN COLOMBIA.....	39
2.8 MÉTODOS DE REMEDIACIÓN.....	42

2.8.1	Técnicas in-situ / ex-situ.....	44
2.8.2	Alteración de las propiedades del contaminante.	45
2.8.3	Principio de funcionalidad.	46
2.9	LAVADO DE SUELO.	48
2.9.1	Lavado de suelo en columnas.....	52
2.10	SURFACTANTE.....	55
2.10.1	Surfactantes no iónicos.....	56
2.10.2	Surfactantes iónicos.....	57
2.10.3	Biosurfactantes.	57
2.11	CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA.	59
2.12	TRITÓN X-100.....	60
2.13	TRATAMIENTO PARA EL AGUA DE LAVADO.....	62
3.	DIAGNOSTICO DE LA ZONA CONTAMINADA.....	64
3.1	INFORMACIÓN GENERAL.	65
3.2	ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	66
3.3	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA.....	68
3.3.1	Aspectos Geológicos.	69
3.3.2	Aspectos Topográficos.	69
3.3.3	Aspectos Hidrológicos.	70
3.4	SUELOS.	71
3.4.1	Aspectos Hidrogeológicos.	72
4.	METODOLOGÍA.....	74
4.1	DIAGNOSTICAR LA ZONA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS.....	74
4.1.1	Identificar los tipos de hidrocarburos que contiene la muestra de suelo.....	74
4.1.2	Recopilación de datos sobre campo Palagua (Puerto Boyacá).....	74

4.1.3 Reconocimiento físico de campo Palagua y observación de la problemática descrita.....	75
4.2 DETERMINAR LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA EL USO DEL SURFACTANTE TRITÓN X-100.	75
4.2.1 Conocer al detalle las características del surfactante comercial Tritón X-100..	76
4.2.2 Determinar las concentraciones a las que se manejará el surfactante Tritón X-100..	76
4.2.3 Determinar las propiedades físico-químicas del suelo.	76
4.2.4 Análisis físico-químico del agua.	80
4.2.4.1 pH.....	81
4.2.4.2 Temperatura.	81
4.2.4.3 Concentración de TPH.....	81
4.3 ESTABLECER LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “LAVADO DE SUELO”.....	81
4.3.1 Diseño de columnas en las cuales se realizara el lavado de suelo.	82
4.4 EVALUAR LA EFICIENCIA DE LA TÉCNICA FÍSICO-QUÍMICA “LAVADO DE SUELO” CON EL USO DEL SURFACTANTE TRITÓN X-100 A DIFERENTES CONCENTRACIONES, PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO.....	83
4.4.1 Análisis químico del agua utilizada en el lavado del suelo.	83
4.4.2 Análisis físico-químico al suelo utilizando en la técnica “Lavado de suelo”.	83
4.4.3 Evaluar la eficiencia de la técnica lavado de suelo con el uso del surfactante TRITON X-100 a diferentes concentraciones.....	83
5. RESULTADOS.....	85
5.1 DIAGNOSTICO DE LA ZONA CONTAMINADA.	85
5.2 RECONOCIMIENTO FISICO DE CAMPO PALAGUA.....	86
5.3 CARACTERISTICAS DEL SURFACTANTE TRITON X -100.....	87
5.4 CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE TRITÓN X-100 USADAS EN EL LAVADO DE SUELO.....	88

5.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA EXTRAÍDA EN CAMPO PALAGUA.....	89
5.5.1 Textura.....	90
5.5.2 Densidad.....	91
5.5.3. Humedad.....	93
5.5.4 Porosidad.....	94
5.5.5 Permeabilidad e infiltración.....	95
5.5.6 Temperatura.....	95
5.5.7 pH.....	96
5.5.8 Materia Orgánica.....	97
5.5.9 Contenido de Nutrientes.....	98
5.5.10 Determinación de la porosidad efectiva y del volumen de poro intercambiado.....	98
5.5.11 Determinación de TPH en el suelo lavado a través del método gravimétrico de Grasas y Aceites (G&A).....	99
5.6 ANÁLISIS DEL AGUA ANTES Y DURANTE EL LAVADO DE SUELO.....	99
5.7 CONDICIONES DE DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “LAVADO DE SUELO”.....	102
5.7.1 Diseño de las columnas utilizadas en el lavado de suelo.	102
5.7.2 Material usado en la aplicación de la técnica de remediación.....	103
5.8 CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	104
5.9 MONTAJE DE LAS COLUMNAS PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “LAVADO DE SUELO”.....	104
5.10 TRATAMIENTO PARA EL AGUA DE LAVADO.....	105
5.11 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MONITOREO FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA UTILIZADA EN EL LAVADO DE SUELO.....	106
5.11.1 Análisis de la variación del ph al agua de lavado.....	106

5.12 DETERMINACION DE TPH EN EL AGUA A TRAVES DEL METODO GRAVIMETRICO GRASAS Y ACEITES.....	110
5.13 RELACION ENTRE LA CONCENTRACION DE G&A EN CADA COLUMNA Y LA CONCENTRACION G&A DEL BLANCO.	120
5.14 ANALISIS DE CARGA.	124
6. CONCLUSIONES.....	130
7. RECOMENDACIONES.....	132
8. BIBLIOGRAFIA.....	134

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Representación esquemática de un perfil del suelo.	23
Ilustración 2. Diagrama esquemático del suelo como un sistema de tres fases.	24
Ilustración 3. Esquema de clasificación para la materia orgánica.....	25
Ilustración 4. Suelo seccionado mostrando una distribución aleatoria del tamaño del poro.	27
Ilustración 5. Triangulo de textura - porcentajes de arcilla, arena y limo.	28
Ilustración 6. CIC. Retención de iones de carga positiva.....	29
Ilustración 7. Escala de pH para suelos.	31
Ilustración 8. Burbuja de aire atrapada obstruyendo el flujo.	32
Ilustración 9. Proceso de lavado de suelo.....	49
Ilustración 10. Efecto solubilizador de los surfactantes	56
Ilustración 11. Variación de las propiedades fisicoquímicas al superarse la CMC.....	59
Ilustración 12. Estructura Molecular del Surfactante TRITON X-100.....	60
Ilustración 13. Tratamiento Anaerobio a lixiviados de un proceso de lavado de suelos..	63
Ilustración 14. Mapa Topográfico 3D – Software Surfer	70
Ilustración 15. Esquema Sistema lavado de suelos.	82
Ilustración 16. Pozo de monitoreo – Predio aledaño, Bajo2.	86
Ilustración 17. Grafica tensión superficial para identificar la CMC. TRINTO X-100.....	88
Ilustración 18. Tamizado del suelo contaminada.....	90
Ilustración 19. Muestra almacenada para análisis de G&A	100
Ilustración 20. Recolección de agua de lavado en cada columna.	101
Ilustración 21. Diseño preliminar de la Columna - Columna Adquirida.	103
Ilustración 22. Montaje de las Columnas - Bomba Peristáltica.	104
Ilustración 23. Llenado de Columnas con suelo contaminado.....	105
Ilustración 24. Tratamiento para el agua de lavado. -Filtro de Carbón Activado.....	106
Ilustración 25. Gráfica comportamiento del pH [250ppm].....	107
Ilustración 26. Gráfica comportamiento del pH [500ppm].....	108
Ilustración 27. Gráfica comportamiento del pH [1000ppm].....	108
Ilustración 28. Gráfica comportamiento del pH [1500ppm].....	108
Ilustración 29. Gráfica comportamiento del pH BLANCO	109
Ilustración 30. Caudal registrado para la columna [250 ppm].....	111
Ilustración 31. Resultados de G&A para la columna [250 ppm].....	111
Ilustración 32. Caudal registrado para la columna [500 ppm].....	113

Ilustración 33. Resultados de G&A para la columna [500 ppm].....	113
Ilustración 34. Caudal registrado para la columna [1000 ppm].....	115
Ilustración 35. Resultados de G&A para la columna [1000 ppm].....	115
Ilustración 36. Caudal registrado para la columna [1500 ppm].....	116
Ilustración 37. Resultados de G&A para la columna [1500 ppm].....	117
Ilustración 38. Caudal registrado para la columna BLANCO	118
Ilustración 39. Resultados de G&A para la columna BLANCO	118
Ilustración 40. Relación $[G\&A_{250ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$	120
Ilustración 41. Relación $[G\&A_{500ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$	121
Ilustración 42. Relación $[G\&A_{1000ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$	122
Ilustración 43. Relación $[G\&A_{1500ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$	123
Ilustración 44. Carga Contaminante Columna [250]	125
Ilustración 45. Carga Contaminante Columna [500]	125
Ilustración 46. Carga Contaminante Columna [1000]	126
Ilustración 47. Carga Contaminante Columna [1500]	126
Ilustración 48. Carga Contaminante Columna BLANCO	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del crudo.....	36
Tabla 2. Propiedades del suelo que influyen en los mecanismos de autodepuración del suelo.....	38
Tabla 3. Ítems para identificar una técnica de remediación limpia.	44
Tabla 4. Ventajas y desventajas de las técnicas In-situ y Ex-situ	45
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos, fisicoquímicos y térmicos.	47
Tabla 6. Ventajas y desventajas de la técnica de remediación Lavado de Suelo.....	50
Tabla 7. Ventajas y desventajas de los Biosurfactantes.	58
Tabla 8. Características físicas del surfactante TRITÓN X-100.....	61
Tabla 9. Propiedades físico-químicas del suelo - Campo Palagua.	71
Tabla 10. Propiedades físicoquímicas del suelo, métodos y ecuaciones.	77
Tabla 11. Lecturas de hidrómetro y temperatura - Textura Suelo Contaminado.	90
Tabla 12. Lecturas de hidrómetro y temperatura - Textura Suelo contaminado.....	91
Tabla 13. Resultados de Densidad Aparente en suelo contaminado.	91
Tabla 14. Resultados de Densidad Real.	92
Tabla 15. Resultados Humedad Gravimétrica suelo contaminado.....	93
Tabla 16. Resultados Porcentaje Humedad Volumétrica del Suelo Contaminado.	93
Tabla 17. Resultados de Porosidad Total del Suelo Contaminado.	94
Tabla 18. Resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad e infiltración.....	95
Tabla 19. Resultados en la medición de temperatura del suelo.....	96
Tabla 20. Resultados determinación de pH - Suelo Contaminado.....	96
Tabla 21. Datos obtenidos en la determinación de %MO. Suelo Contaminado	97
Tabla 22. Resultados %C y %MO en el suelo contaminado.	97
Tabla 23. Resultados Obtenidos de porosidad efectiva y volumen de poro intercambiado.	98
Tabla 24. Fechas de recolección - Muestras agua de lavado	100
Tabla 25. pH y Temperatura del Agua sin mezcla de surfactante.....	107
Tabla 26. Carga removidas de G&A.....	127
Tabla 27. Resumen de resultados obtenidos en el análisis de G&A y carga total removida	128

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A Diagnóstico de la zona contaminada

ANEXO B Ficha datos de seguridad TRITÓN X-100

ANEXO C Determinación Concentración Micelar Crítica

ANEXO D Control diario de las columnas

RESUMEN

TITULO: EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL SURFACTANTE TRITON X-100 EN LA REMEDIACIÓN DE UNA MUESTRA DE SUELO CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS A ESCALA LABORATORIO, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE REMEDIACIÓN LAVADO DE SUELO.

AUTOR: Wilmar Alfredo Hernández López.

FACULTAD: Ingeniería Ambiental.

DIRECTOR: Angélica María Muskus Morales.

Ante la necesidad de implementar acciones que ayuden a recuperar los suelos contaminados por hidrocarburos en nuestro país, el Instituto Colombiano de Petróleos junto con la Universidad Pontificia Bolivariana, incentivaron este proyecto investigativo enfocado a la remediación de suelos contaminados con Hidrocarburos. La metodología desarrollada en este proyecto, fue dividida en cuatro fases direccionadas al cumplimiento de los objetivos específicos y general del mismo, teniendo así los fundamentos correctos para dar un paso en el proceso de remediación de un predio afectado por derrames de hidrocarburos, perteneciente a la empresa ECOPETROL S.A. Inicialmente se realizó un estudio detallado del área de influencia directa e indirecta del proyecto y de actividades relacionadas con la recuperación de la zona contaminada, con el fin diagnosticar la zona de estudio. Para la segunda fase del proyecto se realizó la caracterización fisicoquímica del suelo contaminado, con la cual se conoció el impacto negativo que ocasiona la contaminación por hidrocarburos sobre el suelo de Campo Palagua. Las condiciones de diseño y operación para la aplicación de la técnica de remediación, fueron determinadas en la tercera fase, al igual que las condiciones para el uso del surfactante; teniendo como resultado, un sistema en columna de dimensiones 40 cm de altura y 10 cm de diámetro, con flujo ascendente de solución de lavado a caudal de 0.5 ml/min y cuatro concentraciones de surfactante Tritón X-100, las cuales se establecieron en 1, 2, 4 y 6 veces la Concentración Micelar Crítica. Pasados los cuatro meses de lavado, se realizó el análisis final del proyecto y se concluyó que, la concentración de surfactante más eficiente en la remoción de hidrocarburos fue la de 4 veces la CMC, ya que se encontró menos cantidad de contaminación en la solución de lavado de la columna trabajada a 6 veces la CMC; logrando identificar la concentración de 1000 ppm como la más óptima para remover hidrocarburos en suelos contaminados.

PALABRAS CLAVE: Remediación, CMC, Surfactante, Tritón X-100, Fisicoquímicas.

ABSTRACT

TITLE: EFFECT OF VARYING THE CONCENTRATION OF SURFACTANT TRITRON X-100 IN THE REMEDIATION OF A SOIL SAMPLE CONTAMINATED WITH HYDROCARBONS, LABORATORY SCALE, USING THE TECHNIQUE OF SOIL WASHING REMEDIATION.

AUTHOR: Wilmar Alfredo Hernández López.

FACULTY: Ingeniería Ambiental.

DIRECTOR: Angélica María Muskus Morales.

Given the need to take measures to help restore soils contaminated by oil in our country, the Instituto Colombiano de Petróleos (Colombian Institute of Petroleum) together with the Universidad Pontificia Bolivariana (Pontificia Bolivariana University), encouraged this research project focused on the remediation of soils contaminated with hydrocarbons. The methodology developed in this project was divided into four phases routed to the fulfillment of the specific and general objectives of the project, having in this way the right foundations to step in the process of remediation of a piece of land affected by oil spills that belong to the Ecopetrol company. Initially, a detailed study of the area of direct and indirect influence of the project and activities related to the recovery of the contaminated area was carried out in order to diagnose the study area. For the second phase of the project the physicochemical characterization of this contaminated soil was done, which revealed the negative impact that is caused by hydrocarbons on the soil of the Campo Palagua area. The design and operating conditions for the implementation of the remediation technique were determined during the third stage, the same as the conditions for the use of the surfactant, obtaining as a result, a column system of dimensions 40 cm height and 10 cm in diameter, with an upward flow of washing solution at a flow rate of 0.5 ml / min and four concentrations of surfactant, which were set to 1, 2, 4 and 6 times the CMC. After four months of washing, the final analysis of the project was carried out and it was concluded that the most efficient concentration of surfactant in the removal of hydrocarbons was the 4 times the CMC, as it was found less contamination in the washing solution of the column worked at 6 times the CMC. and succeeded in identifying the concentration of 1000 ppm as the most optimal for removing hydrocarbons in contaminated soils.

KEYWORDS: Remediation, CMC, surfactant, Triton X-100, Physicochemical.

INTRODUCCIÓN

El uso desmesurado de los recursos naturales, provocado por la forma de suplir las necesidades de una sociedad basada en un consumismo sustentado energéticamente por combustibles, ha dejado día tras día una huella que parece imborrable en el ambiente.

Las actividades que van encaminadas a suplir los menesteres del hombre, son inherentes a contaminar el entorno en el que habitamos; el termino contaminación ambiental hace referencia a la presencia de cualquier agente (físico, químico o biológico) en lugares, formas y concentraciones tales que, representan un riesgo o un daño para la salud, para el bienestar de la población y para la vida vegetal o animal. [3]

El suelo, desde el punto de vista ambiental, es un cuerpo natural dedicado a la interacción dinámica con la atmósfera y los estratos, que influye en el clima del planeta, en el ciclo hidrológico y paralelamente, sirve como un medio de crecimiento para las comunidades versátiles de los organismos vivos. Así mismo, el suelo juega un papel impórtate, ya que actúa como un reactor bio-físico-químico que descompone los productos desechados y los recicla en nutrientes para la regeneración continua de la vida en la tierra.

Una de las principales acciones que contaminan, tanto directa como indirectamente, el recurso suelo, son las actividades relacionadas con la producción de petróleo; la contaminación por hidrocarburos es generada debido a la liberación de este compuesto en el ambiente, ya sea de forma intencional o accidental; dicha contaminación produce una alteración del sustrato original, en el que se implantan las especies vegetales, dejando así suelos inutilizables durante años. [2]

La explotación de petróleo en Colombia ha tenido un avance considerable desde 1921, año en el cual la Tropical Oil Company inició la actividad petrolera en el

país. El elevado nivel de producción de crudo se ha visto reflejado en la cantidad de pozos que se explotan anualmente; para “1995 se exploraban unos 10 pozos al año, en 2009 fueron 75 y en 2010 se llegó a 110. Actualmente el Gobierno apunta a que en los próximos 4 años se exploren 574 pozos, lo que significa más de 120 por año.” (CHAGÜENDO, Francy Elena; 2011)

La empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL) inicio sus actividades en el año 1951 y con ello se dio apertura a una era de producción de crudo en el país; tal ha sido el impacto de la empresa, que hoy en día ésta se encuentra posicionada entre las 40 petroleras más grandes del mundo y a nivel nacional es considerada como la empresa más grande de país. [4]

En contraste a lo anterior y dando una mirada desde la perspectiva ambiental, en la empresa se han presentado una serie de eventos que han ocasionado impactos negativos al entorno natural. Uno de estos impactos se presentó el año 1997 en el Campo Palagua, en dicho lugar se produjo un accidente en el cual se ocasionó un derrame y a su vez un incendio en el predio aledaño a la estación 1 del campo ya mencionado. [23]

La iniciativa de realizar este proyecto investigativo nace de la necesidad de encontrar una solución a tal problemática; aunque en el sitio del derrame se han implementado alternativas para controlar la pluma contaminante, aún no se tiene una solución certera para poder remover el hidrocarburo de toda la zona afectada.

Los procesos y mecanismos que se han desarrollado a nivel mundial con el objetivo de remediar y recuperar los suelos afectados por derrames de hidrocarburos, abarcan principios de funcionalidad biológicos, térmicos y fisicoquímicos, siendo este último grupo, el más utilizado para remover un amplio rango de contaminantes, ya sean orgánicos o inorgánicos. [24]

El método de remediación fisicoquímico lavado de suelo, es una técnica aplicable tanto in-situ como ex-situ, que utiliza para la remoción de hidrocarburos en el suelo, aditivos que aumentan la movilidad de estos, con el fin de extraerlos o transportarlos de una fase solida a fase una acuosa [24]. Dando con esto viabilidad de futuras aplicaciones de la técnica, a escala real, en Campo Palagua.

El objetivo principal de esta investigación será identificar la concentración más efectiva, entre cuatro concentraciones, para remover los hidrocarburos totales de petróleo de una muestra de suelo contaminada proveniente de campo Palagua, a través de la técnica fisicoquímica de remediación Lavado de Suelos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar el efecto de la variación de la concentración del surfactante Tritón X-100 mediante la aplicación de la técnica “Lavado de Suelo”, para una muestra contaminada, a escala laboratorio, proveniente de Campo Palagua(Puerto Boyacá), área perteneciente a Ecopetrol S.A

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diagnosticar la zona contaminada con hidrocarburos proveniente de Campo Palagua (Puerto Boyacá), área perteneciente a Ecopetrol S.A.
- Determinar las concentraciones de trabajo del surfactante, las propiedades fisicoquímicas del suelo y del agua de mezcla para el uso del surfactante Tritón X-100 en la técnica “Lavado de Suelo” para la remediación de un suelo contaminado.
- Establecer las condiciones de diseño para la aplicación de la técnica “Lavado de Suelo” mediante el surfactante Tritón X-100 a escala laboratorio.
- Evaluar la eficiencia de la técnica fisicoquímica lavado de suelo con el uso del surfactante Tritón X-100 a diferentes concentraciones, para la remoción de hidrocarburos totales de petróleo.

2. MARCO TEORICO.

2.1 SUELO.

Según Daniel Hillel, “el suelo es cualquier cosa excepto una entidad homogénea; de hecho, es un órgano muy variable con una amplia gama de atributos”. [1]

Desde el punto de vista ambiental y teniendo en cuenta la definición anterior, podemos decir que el suelo es un cuerpo natural que interactúa con todo su entorno; éste posee características particulares que son definidas tanto por el clima como por los micro y macro organismos que habitan en él. También es válido señalar que es un agente depurador capaz de degradar e inmovilizar contaminantes ya que descompone los residuos desechados y los recicla en nutrientes. [2]

2.2 FORMACIÓN Y PRINCIPALES CARACTERISTICAS DEL SUELO.

La formación de los suelos está determinada por cinco factores (Clima, material parental, macro y microorganismos, topografía y tiempo) que ayudan a definir los horizontes y las posibles utilidades del suelo. [2]

Con sus regímenes de temperatura y precipitación, el clima, influye de manera decisiva en la velocidad de formación del suelo y en el tipo de suelo resultante. Por otra parte, ayuda a determinar la distribución de la vegetación y los procesos geomorfológicos dominantes. [2]

El material parental o roca madre, es el soporte sobre el que presumiblemente se ha formado el suelo. Sobre la roca madre se llevan a cabo procesos de transformación que son inherentes a la naturaleza del sustrato, dichos procesos se

caracterizan por la intensidad con la que se manifiestan, tanto así, que a mayor diferencia de intensidad entre proceso de transformación, mayor será la diferencia entre los suelos. [2]

En la formación de los suelos es importante tener en cuenta la interacción de los macro y microorganismos; estos seres vivos ya sean bacterias o grandes mamíferos, contribuyen transformando los sustratos del suelo al momento de extraer los nutrientes necesarios para su ciclo de vida. [2]

El componente topografía, que se ha llegado a considerar independiente a los otros factores, es totalmente dependiente del clima y la naturaleza del material; el relieve que predomina en la zona influye directamente en el balance hídrico de la misma, al igual que en el espesor del suelo, siendo mayor en las áreas planas o con suave pendiente y menor en las zonas muy inclinadas. [2]

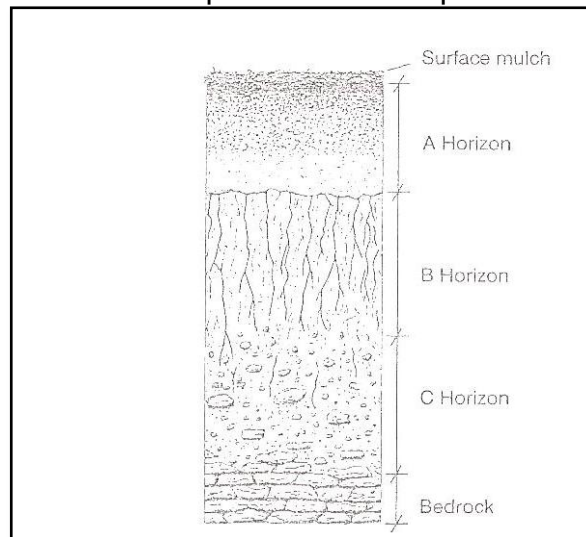
El factor tiempo, aunque lento para todos los suelos puede presentarse a diferentes niveles es decir, algunos suelos pueden presentar valores de velocidad de 1mm/año y otros hasta de 0,001mm/año. Es importante destacar que los valores de tiempo, como factor de formación del suelo, son complejos de determinar, usualmente éstos se identifican de manera indirecta utilizando los hallazgos botánicos, zoológicos, geológicos o geomorfológicos. [2]

2.3 PERFILES DEL SUELO.

El perfil del suelo, por lo general, consiste en una sucesión de estratos más o menos clara. Estas capas pueden resultar del patrón de deposición o sedimentación como se puede observar en el depositado por el viento (eólica) y particularmente en la depositada por el agua (aluviales). [1]

Al hablar sobre horizontes edáficos (Ver Ilustración 1), se hace referencia a las capas paralelas o de ubicación casi paralela a la superficie del terreno; estas poseen ciertas características que las hacen diferentes entre sí; asimismo se encuentran ligadas genéticamente la una de la otra y pueden estar estrechamente relacionadas si se analizan sus propiedades físicas, químicas y biológicas. [1]

Ilustración 1. Representación esquemática de un perfil del suelo.



Fuente: HILLEL, Daniel; Environmental Soil Physics

El grado de expresión o potencia de los horizontes puede presentar gran variación, dicho de otra manera, es posible encontrar horizontes con alturas (grosor) de metro y otros donde éste sea casi imperceptible. [1]

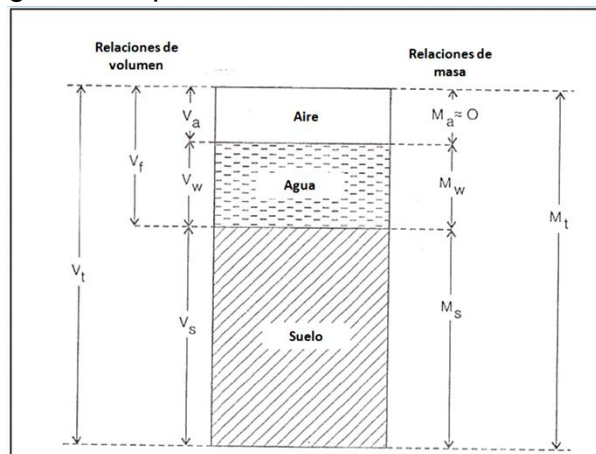
2.4 SUELO COMO SISTEMA DE TRES FASES.

La naturaleza es una entidad integrada por sistemas; dentro de ella, el suelo es considerado un subsistema, el cual está conformado por tres fases: gaseosa, líquida y sólida. [1] (Ver Ilustración 2).

El término sistema, hace referencia a un grupo de elementos interdependientes; éstos pueden variar enormemente en sus grados de complejidad, es decir, pueden estar conformados por una o más sustancias y por una o más fases. [1]

El suelo es un sistema heterogéneo, polifásico, disperso y poroso; las tres fases de este sistema están representadas inicialmente por la fase solidad, la cual es identificada desde la matriz del suelo, luego se tiene la fase líquida; ésta hace referencia al agua dentro del suelo y se caracteriza por contener sustancias disueltas; y finalmente se tiene la fase gaseosa, que también es conocida como la atmósfera del suelo. [1]

Ilustración 2. Diagrama esquemático del suelo como un sistema de tres fases.



Fuente: HILLEL, Daniel; (1998); Environmental Soil Physics.

2.5 PROPIEDADES DEL SUELO.

Las propiedades del suelo son el resultado de diversos procesos que durante un largo periodo han actuado sobre el material en la roca madre. Las características físicas y químicas del suelo, nos permiten conocer a fondo detalles relacionados con su preservación tales como: cuál es el uso más óptimo que se le puede dar, qué tipo de contaminación puede éste presentar e incluso, hasta qué punto puede

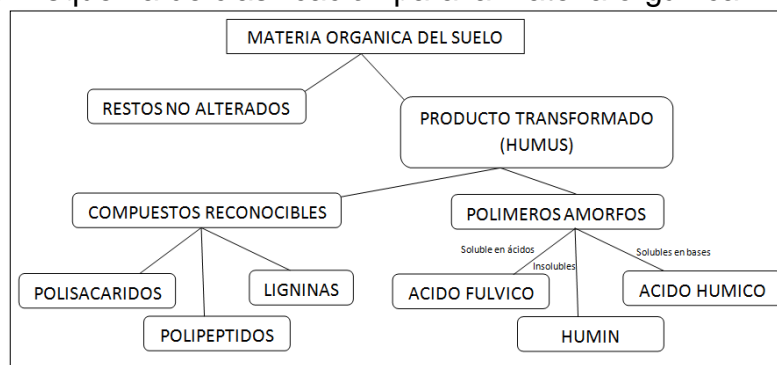
éste ser explotado. Todo esto, con el fin de no generar una contaminación mayor y desgastar ó saturar los suelos. [6]

2.5.1 Contenido de materia orgánica. La materia orgánica de suelo procede principalmente de plantas, animales y microorganismos; esta biomasa muerta junto con sus procesos de alteración, son los responsables de integrar esta propiedad a los suelos formados en la roca madre. [7]

Las funciones que cumple la materia orgánica, pueden llegar a ser benéficas o nocivas para el suelo; entre los procesos que ésta lleva a cabo, se encuentran: mantener una óptima estructura de los poros; mejorar la retención de agua dentro del sistema; generar una retención de nutrientes mediante el intercambio catiónico (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+}); adsorber tóxicos orgánicos potenciales tales como pesticidas, aguas industriales etc; y liberar el nitrógeno, fósforo, sulfuros y otros elementos trazas que quedan de la mineralización. [7]

De igual manera, es importante mencionar que la materia orgánica posee una clasificación en cuanto a los componentes que se originan de ella (Ver Ilustración 3) y finalmente, que la fracción arcillosa del suelo y la materia orgánica tienen una influencia extremadamente importante en las propiedades físicas y química del mismo. [7]

Ilustración 3. Esquema de clasificación para la materia orgánica.



Fuente: B. McBRIDE, Murray; ENVIRONMENTAL CHEMISTRY OF SOILS

2.5.2 Contenido de humedad. El contenido de agua y aire en el suelo son las características que mejor nos ayudan a entender su comportamiento, es decir nos favorece a entender los cambios que se generan con relación al volumen, la cohesión y la estabilidad mecánica etc. [7]

El contenido de humedad del suelo hace referencia a la cantidad de agua (masa o volumen), que se halla en cada posición de un suelo en un momento determinado. [8]

La cantidad de agua dentro del sistema suelo, usualmente es determinado con el fin de conocer la relación que existe entre la química, la mecánica y la biología del suelo. Un método directo para determinar la humedad en una muestra de suelo, se basa en calcular su porcentaje tras someter ésta a una temperatura de 105 °C, otro método utilizado, aunque de forma indirecta, consiste en calcular su valor a partir del porcentaje HG (Humedad Gravimétrica) y el valor de DA (Densidad Aparente); paralelo a estos, existen métodos llamados no destructivos tales como: atenuación de neutrones, reflectometría de dominio magnéticos de tiempo (TDR) y atenuación de rayos γ . [8]

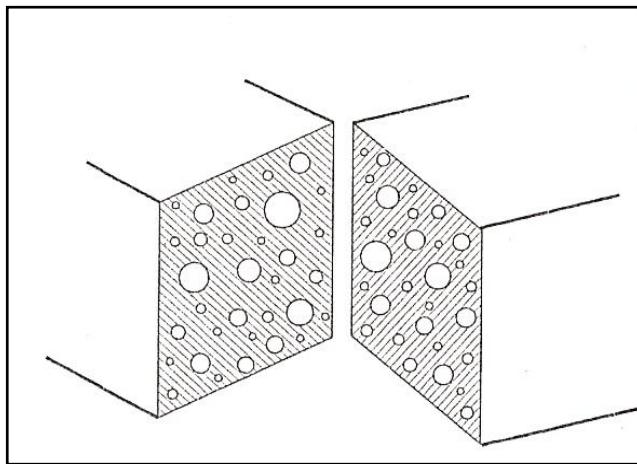
2.5.3 Permeabilidad e infiltración. El término permeabilidad indica la capacidad con la que un fluido (Agua o Aire) atraviesan un medio poroso. Con este concepto y el valor de la velocidad de infiltración, se puede definir si un suelo posee una permeabilidad muy lenta, moderada o muy rápida. [9]

La infiltración es el primer paso en el movimiento del agua dentro de la matriz suelo; el concepto de infiltración se refiere al proceso de penetración del agua dentro de un medio poroso sólido. La velocidad a la cual el agua entra en el suelo a cada instante, es denominada velocidad de infiltración y es determinada por el tipo y estructura del suelo y por el contenido de agua en el mismo. [1]

2.5.4 Porosidad. En el sistema suelo, los sectores que no presentan material sólido son denominados espacios porosos. A su vez, estos espacios poseen dos tipos de poros: los macroporos, representan el mayor espacio en el que las raíces se desarrollan y son los responsables del drenaje y aireación del suelo. [1]

Los microporos, por otro lado, son los encargados de retener el agua y dejarla a disposición de las plantas. La porosidad total del suelo está determinada por la suma de los macro y microporos; es importante recalcar que las características de estos, están determinadas por la textura y estructura del suelo. [1] (Ver ilustración 4)

Ilustración 4. Suelo seccionado mostrando una distribución aleatoria del tamaño del poro.



Fuente: HILLEL, Daniel; (1998); Environmental Soil Physics.

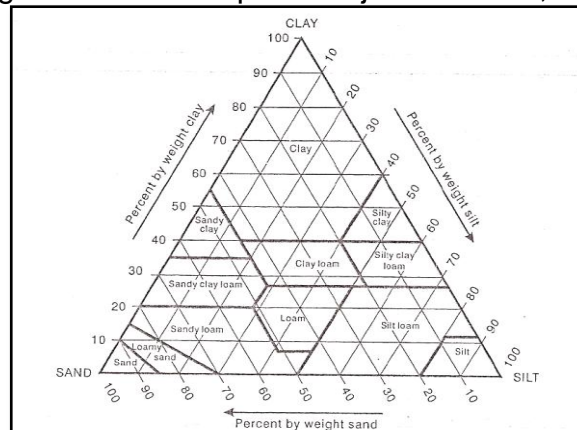
Es válido mencionar que pueden existir dos suelos con la misma porosidad total y poseer una gran diferencia en cuanto a su comportamiento frente al agua y el aire; así pues, los suelos arcillosos pueden presentar una mayor cantidad de microporos y en menor proporción de macroporos, favoreciendo la retención de agua, pero al mismo tiempo haciendo que el suelo tenga una muy baja percolación

y aireación; los suelos arenosos presentan una situación inversa, en la cual favorecerá la capacidad de percolación y aireación, generando una baja retención de agua. [10]

2.5.5 Textura. Dentro de los diversos atributos que posee el sistema suelo, podemos encontrar su diversidad de tamaño en las partículas que lo constituyen; la textura, es la propiedad que nos ayuda a identificar la porción de cada elemento en el suelo (arena - arcilla - limo), y la cual proporciona las condiciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas.[9] [11]

La textura de un suelo posee diversas clasificaciones, las cuales nos ayudan a dar un nombre exacto al tipo de suelo que se analiza; una de las clasificaciones más comunes y más utilizadas es la brindada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). [11]. (Ver Ilustración 5)

Ilustración 5. Triangulo de textura - porcentajes de arcilla, arena y limo.

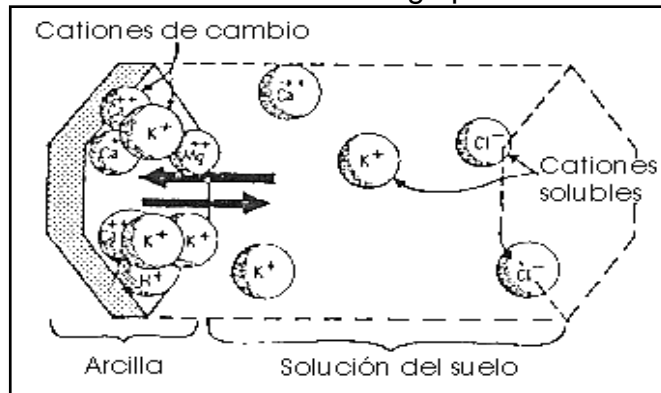


Fuente: HILLEL, Daniel; (1998); Environmental Soil Physics.

Diagrama triangular o triángulo de textura como es denominado este método de clasificación, consiste básicamente en identificar las porciones de arena, limo y arcilla con el fin de conocer qué tipo de suelo se posee. [11]

2.5.6 Capacidad de intercambio catiónico. La CIC es la habilidad que tiene el suelo para adsorber cationes, es decir, la capacidad de retener iones con carga eléctrica positiva. (Ver ilustración 6) La presencia de partículas cargadas negativamente en el suelo, favorecen la interacción constante entre los iones de carga contraria y este sistema. [7]

Ilustración 6. CIC. Retención de iones de carga positiva



Fuente: Departamento de edafología y química agrícola universidad de granada España URL: <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema05/ccs.htm>

El intercambio de iones causa grandes cambios en el comportamiento del suelo, en otras palabras, estos movimientos de cargas contribuyen a que el suelo posea características tales como; controlar la disponibilidad de nutrientes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{+2}) para las plantas y permitir la retención de elementos contaminantes que se incorporan al suelo, haciendo que éste funcione como un depurador natural. [7]

Según Antonio Jordan, 2005, “La CIC de la materia orgánica es de 3 a 5 veces superior a la CIC de las arcillas. Este valor depende esencialmente del grado de oxidación de la materia orgánica humificada. Al aumentar el grado de oxidación aumenta también el número de grupos funcionales capaces de intercambiar

cationes con el medio”; Así pues, la CIC de un suelo puede variar notablemente dependiendo del tipo de mineral de arcilla y de los componentes orgánicos que este posea.

La CIC es expresada usualmente en miliequivalentes por gramos de suelos (meq/100g); como se mencionó antes, este valor está sujeto en gran parte al contenido orgánico y mineral del suelo e igualmente dependerá de la acidez y la mineralogía de la arcilla. [12]

2.5.7 Contenido de nutrientes. Los nutrientes son elementos químicos disueltos en el suelo que contribuyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas; estos elementos se clasifican en dos grupos, los macronutrientes y los micronutrientes. [9]

La clasificación de los nutrientes hace referencia a la cantidad del elemento químico, que requiere la planta para su óptimo crecimiento, los macronutrientes tales como C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, son los elementos que las plantas toman en mayor cantidad; y los micronutrientes, tales como Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn, Cl, son aquellos elementos que se requieren en poca cantidad, sin embargo su insuficiencia da lugar a una carencia, y su exceso a una toxicidad. [13]

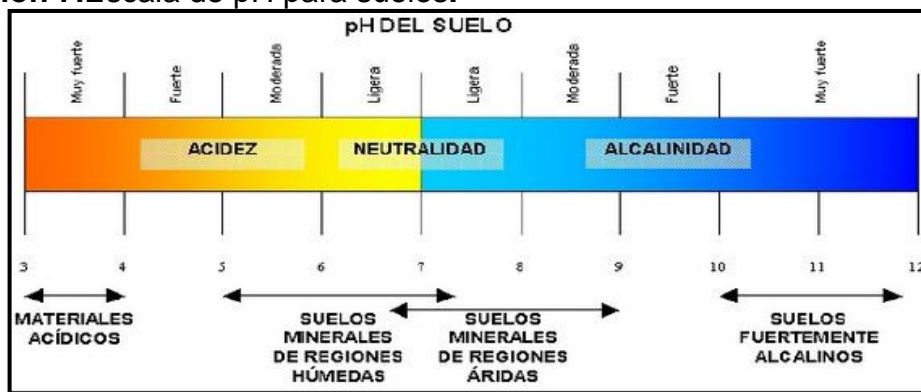
La disponibilidad de los nutrientes no solo está determinada por factores que afectan su retención o su movilidad, también existen diversos procesos físico-químicos que hacen posible la presencia de estos en el sistema suelo. [14] “Los factores que afectan la disponibilidad de nutrientes son pH, contenido en materia orgánica, textura y potencial redox” (LOUÉ, 1988).

Finalmente, los macro y micronutrientes pueden presentarse de 5 formas diferentes: soluble, intercambiable, asociados a la materia orgánica, asociados a óxidos, asociados a minerales primarios y secundarios. [14]

2.5.8 pH. El potencial de hidrogeno ó pH, hace referencia a la cantidad de iones de hidrógenos activos (H+) en la interfase liquida del suelo. Este parámetro juega un papel importante a la hora de conocer la calidad del suelo. [15]

La medida de pH de un suelo pueda variar de 3 a 12, siendo los primeros, suelos con sulfatos ácidos y los segundos, suelos alcalinos. (Ver Ilustración 7)

Ilustración 7.Escala de pH para suelos.



Fuente: Manual de edafología; departamento de cristalografía, mineralogía y química agrícola de la universidad de Sevilla

El pH ó potencial de hidrogeno, es una característica determinante ya que controla ciertos procesos que intervienen en el desarrollo de los seres vivos. Un ejemplo claro de esto, son las reacciones químicas controladas por el pH en el medio, las cuales determinan la disponibilidad o no disponibilidad de nutrientes para las plantas. [16]

Por otra parte y haciendo énfasis sobre las propiedades físicas, los cambios de pH pueden afectar características tales como: la porosidad, la conductividad hidráulica, el régimen de humedad y temperatura, entre otros. Esto se puede observar claramente en suelos excesivamente ácidos, ya que suelen tener una

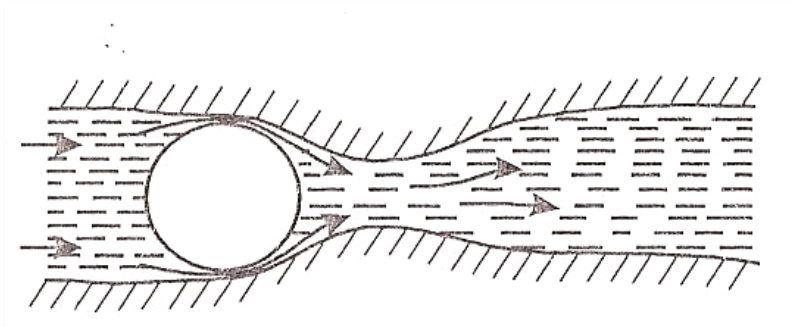
baja porosidad y una estructura poco desarrollada, lo cual ocasiona una mala aireación y baja permeabilidad. [16]

2.5.9 Conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica es una medida de la habilidad de un medio poroso para transmitir agua, y es un parámetro esencial para solucionar problemas agrícolas, hidrológicos y ambientales relacionados con el movimiento del agua a través de suelo y estratas subsuperficiales. (ZELERINO, Quesada, 2006)

El paso del agua a través de la matriz suelo genera una resistencia ocasionada por las moléculas del líquido y las paredes de los poros. [1] Según Reichardt, 1985, la conductividad hidráulica puede variar dependiendo del tipo de textura y estructura que posea el suelo, siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados.

Desde el punto de vista práctico, es válido reconocer que resulta difícil tener un valor acertado de la conductividad cuando se ha saturado un suelo con agua, ya que se genera encapsulamiento de burbujas de aire que bloquean los conductos de los poros, teniendo como resultado un cambio en la medición del parámetro. [1] (Ver Ilustración 8)

Ilustración 8. Burbuja de aire atrapada obstruyendo el flujo.



Fuente: HILLEL, Daniel; (1998); *Environmental Soil Physics*.

Los suelos con estructura estable o medio poroso rígido pueden presentar una medida de conductividad casi constante; el rango de oscilación de esta medida puede presentarse entre 10,4 – 10,5 m/seg para suelos arenosos y 10,6 – 10,9 m/seg en suelos arcillosos. [1]

2.5.10 Densidad real y aparente. Como se había mencionado antes, el suelo es un cuerpo trifásico conformado por agua, aire, partículas orgánicas y minerales; dentro de esta relación de fases debe existir un balance, 50% sólido – 50% agua-aire, para que el suelo se pueda considerar productivo y ambientalmente óptimo. [1]

El cálculo de la densidad en el suelo se puede expresar de dos maneras diferentes; la densidad aparente (D_a) relaciona la masa de suelo seco y el volumen total de éste. Por otro lado, La Densidad Real (D_r) permite considerar la densidad de la fase sólida del suelo y no tiene en cuenta la parte porosa del mismo. Asumiendo estos valores ($D_r - D_a$) es posible calcular la porosidad total del suelo, al igual que evaluar la concentración de sólidos en suspensión y determinar la velocidad de sedimentación. [9]

La D_a está estrechamente relacionada con la textura, la estructura, el sistema poroso del suelo y la compactación. La disminución del espacio poroso es causante de un aumento en la densidad aparente del suelo; por el contrario, algunos factores que pueden comprometer la disminución de la D_a están relacionados con la reducción del contenido de materia orgánica y la degradación de la estructura del suelo. [17]

2.6 SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS.

Día a día se generan cientos de soluciones encaminadas a suplir las necesidades de las poblaciones humanas, las cuales a medida que pasa el tiempo crecen sin ningún control; algunas de estas soluciones están relacionadas con la producción de petróleo, bien sea porque éste se utilice como combustible, materia prima para sintetizar plásticos o como lubricantes etc.

Actualmente, la problemática ambiental más importante que enfrentamos es la contaminación de ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos, a causa de los derrames de hidrocarburos de petróleo. Los productos derivados del petróleo que son arrojados al suelo no sólo contaminan los ecosistemas que encuentran a su paso, sino también, pueden llegar a migrar hasta alcanzar aguas subterráneas generando una contaminación mayor.

El proceso para extraer el petróleo del subsuelo terrestre puede resumirse básicamente en cuatro fases (Prospección sísmica – Perforación – Extracción – Transporte), la extracción del petróleo da inicio con la prospección sísmica, la cual consiste en crear temblores artificiales de tierra con el fin de generar una ecografía del subsuelo por medio de ondas; luego a través de las perforaciones se llega al lugar donde se estima está almacenado el crudo. Habiendo encontrado éste, se realizan una serie de extracciones iniciales para determinar el tamaño de la reserva, con el fin de determinar una viabilidad comercial y construir más pozos, finalmente se realiza el transporte del crudo por medio de oleoductos a una estación donde éste será tratado. [40]

La contaminación del suelo generada por hidrocarburos, dentro de los procesos de extracción del petróleo, empieza a manifestarse a partir de la fase de perforación hasta la llegada del crudo a la refinería. En la perforación, el suelo se ve impactado negativamente a causa de los lodos de perforación, los cuales contienen gran cantidad de aditivos químicos y aunque algunos de estos son

basados en agua, pueden llegar a contener cantidades considerables de hidrocarburos que van de 100 a 7000 ppm. [40]

En la fase de extracción, si bien ya se ha encontrado el petróleo, se genera nuevamente contaminación a causa del crudo utilizado como prueba preliminar; este crudo desechado, es depositado en piscinas donde previamente se han eliminado los restos de la perforación; teniendo así, una problemática mayor debido al posible rebose del contenido o la migración hacia fuentes subterráneas. Por otra parte, al encontrar viabilidad económica se construirían más pozos, generando nuevamente los impactos ya mencionados. [40]

Finalmente, en la fase de transporte es posible generar más contaminación, a causa de goteo de tuberías u otras infraestructuras, corrosión de las mismas y accidentes ocurridos por negligencia en esta operación. [40]

Las fracciones de petróleo tomadas en los pozos de extracción pueden clasificarse con ayuda de la gravedad API. Esta medida de densidad, llamada así por sus siglas en inglés (American Petroleum Institute), permite conocer cuán pesado es el crudo con relación al agua. Las clases de crudo que se generan a partir de esta medida son: livianos, medianos, pesados y extrapesados. [28]

Teniendo como referencia que el grado API del agua es de 10, los crudos pueden clasificarse de forma general en: livianos, quienes se caracterizan por poseer un valor mayor a 10 °API, por esta razón flotan en el agua; y extrapesados, los cuales presentan un valor menor a 10 °API y por consiguiente se asientan en el fondo del agua. [28]

A continuación en la Tabla 1. se muestra la clasificación de los crudos con relación a la gravedad API

Tabla 1. Clasificación del crudo.

CLASIFICACIÓN DEL CRUDO	GRADOS API
Liviano	Mayor a 31,1
Mediano	Entre 22,1 y 31,1
Pesado	Entre 10 y 22,1
Extrapesado	Menor a 10

Fuente: Autor

Según (Dorn et al., 1998), el petróleo ligero es más tóxico que los petróleos mediano y pesado, debido a que tiene grandes cantidades de hidrocarburos saturados y contenidos bajos de compuestos polares.

La medida API puede ser utilizada también para comparar densidades entre dos crudos; es decir, si un producto de petróleo flota entre otro indicaría que éste es más liviano, por lo tanto presenta una gravedad API mayor. [28]

La contaminación generada por el petróleo representa un riesgo potencial para la salud y aun más cuando el proceso para su degradación se hace complejo. En el suelo los hidrocarburos pueden impactar negativamente al punto de generar cambios en la dinámica de la fauna y la flora, también reducir o inhibir el desarrollo de la cobertura vegetal y finalmente, como se había mencionado ya, afectar las corrientes de agua subterránea y superficial. [18]

Una propiedad importante a la hora de estudiar la migración del contaminante a través del sistema suelo es la viscosidad, esta propiedad junto con las características del sitio (topografía, nivel freático etc.), y algunas propiedades físico-químicas del suelo (permeabilidad, tamaño de la partícula, contenido de materia orgánica etc.), determinan la movilidad de la pluma contaminante. [20]

Los hidrocarburos de petróleo que logran penetrar la superficie del suelo debido a su baja viscosidad, pueden encontrarse de diferentes formas dentro del sistema; en ese sentido los contaminantes podrán permanecer en estado gaseoso y dentro

de los espacios si estos son volátiles, otros adsorbidos por la fase sólida del suelo y finalmente en la fase líquida los disueltos por el agua. Por otra parte, los hidrocarburos que permanecieron en la superficie, debido a su alta viscosidad, estarán expuestos a sufrir cambios a causa de la radiación solar, la pérdida de humedad y la acción de la naturaleza. [20]

Cabe mencionar que la contaminación en la superficie terrestre ocasiona una inhibición en la germinación y crecimiento de las plantas. El hidrocarburo derramado puede llegar a moverse a tierras más bajas y cubrir una área mayor de contaminación, por otro lado esta capa de contaminación hace imposible un intercambio gaseoso con la atmósfera, lo cual genera que los procesos naturales del suelo sean lentos y se ocasione una mayor toxicidad. [20]

Por último, los solventes que logran penetrar la superficie del suelo en ciertos casos pueden quedar adheridos a las partículas del suelo, también, una pequeña parte puede ser degradada por microorganismos o finalmente terminar depositados en las aguas subterráneas las cuales movilizarán la contaminación a otras áreas. [19]

La reacción del suelo ante los agentes contaminantes será determinada en algunos casos, por ciertos factores tales como: vulnerabilidad, poder de amortiguación, movilidad, biodisponibilidad, persistencia y carga crítica; al tener en cuenta estos, es posible conocer un umbral de contaminación más preciso y así definir con mayor exactitud los impactos potenciales. [41]

La capacidad de amortiguación tiene una relación inversamente proporcional con la vulnerabilidad; esta última puede ser definida como el grado de sensibilidad frente a la agresión de agentes contaminantes, así pues, a mayor capacidad de amortiguación, menor vulnerabilidad. [41]

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, hacen que este funcione como un reactor en el cual se llevan a cabo procesos de filtración,

descomposición, neutralización, almacenamiento etc. Al mismo tiempo, permiten que posea un poder de amortiguación que lo convierte en una gran barrera protectora para otros medios como son los hidrogeológicos y biológicos. [41]

La capacidad de depuración en un suelo puede llegar a ser elevada, esto dependiendo del tipo de suelo y de cada situación en particular. Los procesos que hacen posible la degradación o inmovilización de los contaminantes son: Neutralización, degradación biótica o abiótica, adsorción, complejización, Insolubilización. [41]

Ciertas características en los horizontes del suelo hacen que la capacidad depuradora del mismo varíe; la capacidad filtrante en este caso, ayuda a regular la facilidad de ingreso de los contaminantes; por otro lado la actividad microbiana contribuye con la descomposición e inmovilización de los contaminantes, y finalmente, las arcillas y materia orgánica adsorben los contaminantes y dificultan su movilización o liberación. [41]

Las acciones que contribuyen con la autodepuración del suelo, mencionadas anteriormente, dependerán a su vez de las propiedades del suelo.

A continuación en la tabla 2. se muestran las propiedades del suelo que influyen en los mecanismos de autodepuración.

Tabla 2. Propiedades del suelo que influyen en los mecanismos de autodepuración del suelo.

PROPIEDAD DEL SUELO	INFLUYE EN :
Textura	Los suelos de textura arcillosa tienen una alta capacidad de autodepuración.
Estructura	Los agentes contaminantes pueden provocar la destrucción de la estructura, por dispersión, si contienen altos contenidos en sodio.

Porosidad y permeabilidad.	Facilitan la circulación de los contaminantes en el suelo y pueden eliminar rápidamente los contaminantes y traspasarlos a los niveles freáticos.
Capacidad de intercambio iónico	Aumenta la capacidad de autodepuración al fijar los contaminantes sobre la superficie de las partículas.
Salinidad	Los contaminantes pueden aumentar la salinidad y como consecuencia disminuir la estabilidad del suelo
pH	Los contaminantes pueden acidificar el suelo, por vertidos o por oxidación de sulfuros y óxidos nitrosos, con lo que aumenta la vulnerabilidad del suelo.
Potencial de óxido-reducción	El ambiente oxidante aumenta el poder autodepurador al facilitar la actividad microbiana de descomposición.
Gases	Ejercen también un importante papel, proporcionando el suficiente oxígeno para la actividad microbiana.

Fuente: TESIS DE GRADO: EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL ESTADO DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN DONDE SE EFECTÚAN ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN HIDROCARBURÍFERA (BRISSIO, Pedro Augusto 2005)

2.7 PROBLEMÁTICA EN COLOMBIA.

La producción de petróleo en Colombia es una actividad que crece constantemente a tal punto que hoy en día, el país es considerado como el cuarto productor de crudo de Latino América. [4]

Esta actividad en el país, según un artículo publicado por el periódico PORTAFOLIO en el año 2011, aumento en mayo en un 18.9 % frente al mismo mes del 2010 cuando fue de 776.000 bpd en promedio. Por otra parte La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) expresó, en esta misma publicación, que la producción de Ecopetrol y sus asociados aumentó en un 20,4% el mes de mayo, a 825.000 bpd en comparación con el año anterior, cuando fue de 685.000 bpd.

El impacto negativo que ocasionan los derrames de petróleo no solo se ve reflejado en el ambiente, por el contrario estos desastres traen consigo efectos negativos en la sociedad, en la economía y en la salud pública de los lugares aledaños al lugar afectado.

Los derrames de petróleo en Colombia están asociados a actividades que van desde el inadecuado transporte que realizan las empresas petroleras, como problemas relacionados con el orden público y grupos al margen de la ley. Es importante resaltar que el inadecuado transporte no es el único factor por el cual se generan derrames, a estos desastres también se asocian, según lo dicho por Ecopetrol en el periódico portafolio en 2011, “las inadecuadas condiciones operativas, fallas en procedimientos y procesos, corrosión de líneas, fallas en sistemas de válvulas, reboses de sistemas de aguas aceitosas y accidentes viales de carro tanques”.

Un ejemplo claro de la problemática que se vive en el país, se ve reflejado en el artículo expuesto por el Periódico El Tiempo el día 7 de junio de 2011, en el cual se expresa que la Empresa ECOPETROL durante los 3 últimos años ha derramado más de 15.000 barriles de petróleo y causado importantes daños ambientales. [21] Ante esta problemática, el gobierno Colombiano ha multado a la empresa por un valor que sobrepasa los 775 millones de pesos, de igual manera, la empresa expresó que se encuentra realizando “trabajos para la construcción de variantes y reposición de líneas para asegurar la integridad de estos sistemas de

transporte y evitar que se presenten incidentes ambientales” y a lo cual ha destinado 600 millones de dólares.

Teniendo en cuenta la situación antes mencionada, es válido resaltar que las empresas petroleras son las directamente responsables de estos desastres ambientales, también que la mejor y más efectiva solución que estas pueden dar, es actuar siempre de forma preventiva y no correctiva para así, evitar una afectación tan significativa al ambiente.

El gobierno Colombiano posee instrumentos de control legislativo, que si bien contribuyen al cuidado y preservación del recurso suelo, tiene un enfoque muy pobre hacia el sector de hidrocarburos y aún más en lo concerniente a derrames de petróleo en medios terrestres.

Las leyes y decretos que ayudan a cuidar el suelo, pero que no están enfocadas para el sector de hidrocarburos, poseen ciertos apartes y artículos que pueden utilizarse de forma indirecta para evitar impactos negativos relacionados con este sector industrial.

Entre la legislación colombiana que se tiene para cuidar el ambiente se pueden mencionar la ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) , y se dictan otras disposiciones; también se tiene el Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente; dentro de este decreto se puede encontrar lineamiento para la preservación ambiental en cuanto a los recursos naturales no renovables. [42]

Como se había mencionado antes, el gobierno colombiano posee muy pocas medidas de control en cuanto a derrames de hidrocarburos en medios terrestres y

acuáticos; ante esta situación se han adoptado algunas normas, convenios y protocolos internacionales.

A continuación se menciona la legislación internacional adoptada por el gobierno colombiano.

- Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate de la contaminación del Pacífico Sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas, en caso de emergencia. Quito, 1983.
- Protocolo de cooperación para combatir derrames de hidrocarburos en la región del Gran Caribe. Cartagena, 1983.
- Convenio sobre la constitución de un fondo internacional de indemnización de daños causados por la contaminación del mar con hidrocarburos (1971) y su protocolo "El Fondo 71/76" (1976).

2.8 MÉTODOS DE REMEDIACIÓN.

El suelo es un recurso natural fundamental para la supervivencia del ser humano; es considerado prácticamente no renovable y puede desempeñar múltiples funciones, todas dependiendo del sitio en el que se encuentre, por ejemplo, desde el punto de vista ambiental puede actuar como medio filtrante del agua que recarga los acuíferos, es decir, funciona como una capa protectora, también ayuda a regular los ciclos biogeoquímicos, el ciclo del agua; y finalmente es el encargado de albergar gran diversidad de organismos. [5]

Desde el punto de vista social, el suelo representa la base para las construcciones de obras civiles; también es el espacio en el cual se desarrollan las actividades agrícolas, ganaderas, forestales y recreativas; y finalmente, dentro de éste se alberga gran parte de la riqueza cultural.

La presencia de un producto contaminante dentro de este recurso natural puede hacer que cualquiera de estas funciones se vean limitadas; ante esta situación es muy importante buscar la forma más adecuada para limpiar o recuperar estos espacios contaminados. [19]

Existen diversos métodos o técnicas para remediar o recuperar los suelos contaminados; entre las técnicas más empleadas hasta ahora para la eliminación de los hidrocarburos contenidos en suelos, podemos citar la extracción de hidrocarburos por vacío, el lavado del suelo, la incineración, la recuperación electrocinética, etc (Clark, 1995). Sin embargo, antes de tomar una decisión y antes de optar por cualquier técnica, es bueno y recomendable establecer un marco de referencia entre todas para concluir cual es la más apropiada. [20]

La mejor forma de elegir una técnica de remediación óptima para la problemática presente, es teniendo en cuenta las características del sitio a remediar, así pues, es de gran importancia conocer a la perfección el problema de contaminación con documentos recientes, comprender las funciones que desempeñaba el sitio contaminado y tener claridad en el uso que se le va a dar al suelo después de su remediación; [20] por otro lado, es bastante necesario conocer las ventajas, desventajas y limitación de las técnicas disponibles e identificar las características de una técnica de remediación limpia, las cuales se exponen en la tabla 3.

A continuación en la Tabla 3 se nombran los ítems que cumple una técnica de remediación limpia.

Tabla 3. Ítems para identificar una técnica de remediación limpia.

- Reducir la concentración de los contaminantes, como respuesta directa a su aplicación.
- No transmitir la contaminación de una matriz a otra.
- Ser irreversible, esto es, no permitir que después de cierto tiempo, los contaminantes vuelvan aparecer en el lugar, como si nada su hubiera hecho.
- No crear mayores disturbios ambientales que los propios de la contaminación.
- Ser una tecnología integral que incluya tratamiento de desechos en caso de generarlos.

Fuente: SAVAL, Susana (Éxitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos.

El término “técnica de remediación” hace referencia a cualquier operación unitaria o en conjunto, que se encarga de alterar la composición de un contaminante con el fin de reducir la toxicidad, la movilidad o volumen de este dentro de una matriz o material contaminado.

Como se había mencionado antes, existen diversas técnicas de remediación y estas se clasifican dependiendo de varios principios; así pues, éstas se pueden categorizar basándose en el lugar en el que se aplican (ex-situ ó in-situ), basándose en la alteración de las propiedades del contaminante (destrucción ó modificación; extracción o separación; aislamiento ó inmovilización) o finalmente, la que más se tiene en cuenta, basándose en el principio de funcionalidad. (Biológica, fisicoquímica y térmica). [24]

2.8.1 Técnicas in-situ / ex-situ. Las técnicas de remediación IN-SITU son llamadas de esta manera ya que, permiten ejecutar el tratamiento de recuperación de la zona contaminada sin necesidad de realizar excavación o transporte del suelo afectado. [24]

Por el contrario, las técnicas EX-SITU se caracterizan por requerir una extracción previa a iniciar el proceso de remediación. En estos métodos de remediación se hace más fácil el manejo y homogenización del suelo contaminado, lo cual ayuda a obtener certeza en la uniformidad de los procesos empleados; también se caracterizan por su corto tiempo de duración y se puede efectuar la remediación en el mismo sitio donde se realizó la excavación o fuera de éste. [24]

A continuación, en la Tabla 4, se muestra las ventajas y desventajas de las técnicas IN-SITU y EX-SITU.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las técnicas In-situ y Ex-situ

	In situ	Ex situ
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar. • Potencial disminución de costos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tiempo de tratamiento. • Más seguro en cuanto a uniformidad, es posible homogenizar y muestrear periódicamente.
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores tiempos de tratamiento. • Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo. • Dificultad para verificar la eficiencia del proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de excavar el suelo. • Aumento en costos e ingeniería para equipos. • Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante.

Fuente: Volke y Velasco, 2002

2.8.2 Alteración de las propiedades del contaminante. Este tipo de clasificación está conformado por tres grandes grupos; inicialmente se tiene el

grupo de las técnicas de destrucción o modificación, las cuales modifican la estructura química del compuesto contaminante presente en la matriz. [24]

En el segundo grupo se encuentran las técnicas de Extracción o Separación quienes con ayuda de las propiedades de los contaminantes, retiran éstos del medio alterado; las propiedades físicas o químicas que se aprovechan en estas técnicas son volatilización, solubilidad, carga eléctrica, entre otras. [24]

Finalmente se tiene el tercer grupo, el cual está conformado por las técnicas de aislamiento o inmovilización; en este caso los contaminantes son retenidos para prevenir su dispersión, luego de estabilizar, solidificar o atrapar los contaminantes, estos pueden disponerse de manera controlada en otro sitio ó reciclarse. [24]

2.8.3 Principio de funcionalidad. Para esta categorización se tiene en cuenta el principio con el cual se desarrolla la técnica de remediación. Así pues, los grupos que conforman este tipo de clasificación son las técnicas biológicas, fisicoquímicas y térmicas. [24]

Los tratamientos biológicos basan su funcionalidad de remoción, degradación o transformación del contaminante, en las actividades metabólicas de algunos organismos tales como plantas, hongos, bacterias, entre otros. Estas técnicas de remediación pueden ser tanto aerobias (presencia de oxígeno) como anaerobias (ausencia de oxígeno). [25]

La remediación de hidrocarburos basada en tratamientos biológicos tiene como principio básico, la digestión de las sustancias contaminantes, por parte de los microorganismos, para así lograr obtener una fuente de carbono que ayudará a que estos tengan un crecimiento continuo. [25]

Los tratamientos fisicoquímicos, se caracterizan por separar, destruir o contener la contaminación con ayuda de propiedades fisicoquímicas, bien sea del medio

contaminado o del producto contaminante en sí. Los procesos que se utilizan en estas técnicas para la remediación pueden ser: filtración, neutralización, precipitación, oxidación/reducción, sorción, evaporación y floculación, entre otros. [24]

Finalmente, las técnicas de remediación térmicas fundamentan su principio de funcionalidad en el calor, con el cual volatilizan, queman, descomponen o funden los contaminantes en la matriz suelo. Estos tratamientos de remediación se caracterizan por ser los más rápidos, pero al mismo tiempo tienden a generar mayores costos a la hora de aplicarlos. Dentro de este grupo podemos encontrar la Desorción térmica, Pirolisis, Incineración, vitrificación. [24]

A continuación en la Tabla 5. se muestra las ventajas y desventajas de las técnicas biológicas, fisicoquímicas y térmicas.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos, fisicoquímicos y térmicos.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Son efectivos en cuanto a costos. • Son tecnologías más benéficas para el ambiente. • Los contaminantes generalmente son destruidos. • Se requiere un mínimo ó ningún tratamiento posterior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren mayores tiempos de tratamiento. • Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. • No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.
TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Son efectivos cuanto a costos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los residuos generados por técnicas de separación, deben

	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden realizarse en periodos cortos. • El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería. 	<p>tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.
TRATAMIENTOS TÉRMICOS		<ul style="list-style-type: none"> • Es el grupo de tratamientos más costoso.

Fuente: VOLKE SEPÚLVEDA, Tania; 2002

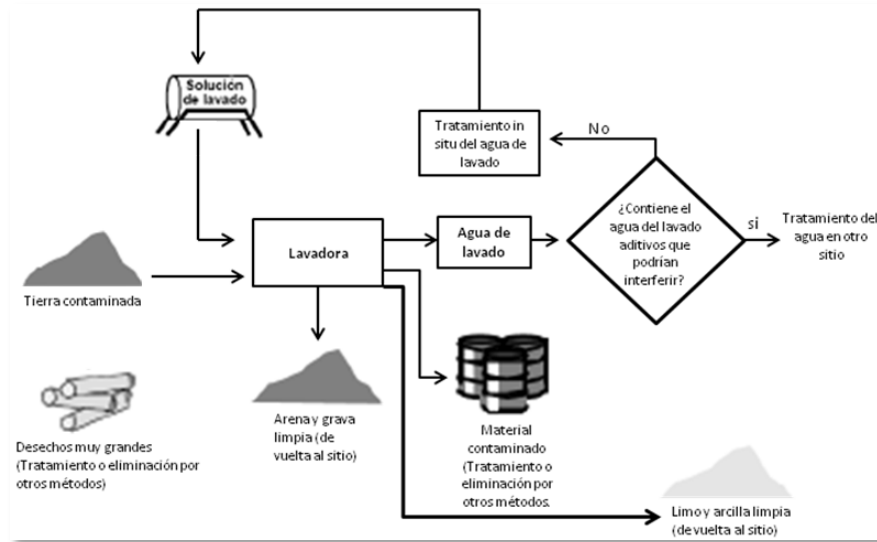
2.9 LAVADO DE SUELO.

Esta técnica fisicoquímica que emplea, para la remoción de los contaminantes, aditivos que aumentan la movilidad de los mismos, puede desarrollarse tanto in-situ como ex-situ; también es empleada principalmente para el tratamiento de hidrocarburos, compuestos orgánicos y metales (Castillo-Espinoza, 2008).

El procedimiento del lavado de suelo consiste en usar soluciones que contengan algún tipo de aditivo (surfactantes, ácidos, bases, oxidantes, disolventes, etc.), con el objetivo de aumentar la solubilidad o movilidad del contaminante para así eliminarlo del suelo. (Ver ilustración 9)

La técnica no solo está integrada por características químicas (uso de aditivos), paralelo a esto, se requiere de un procedimiento mecánico que mezcla el suelo y la solución agua-aditivo, logrando una remoción del contaminante más eficiente.

Ilustración 9. Proceso de lavado de suelo.



Fuente: *Environmental Protection Agency (EPA, 1996)*

Previo a efectuar la técnica de remediación se debe hacer un elección correcta del aditivo que se utilizará; la selección dependerá del contaminante que se quiere remover; en caso de los hidrocarburos es común emplear surfactantes (Castillo-Espinoza, 2008).

Durante el proceso de lavado, las gravas y arenas se separan de los limos y arcillas, en los cuales la contaminación se une con mayor facilidad ya sea de forma física o química; bajo este orden de ideas, se hace una remoción de contaminantes más eficiente cuando en el material a tratar existe mayor cantidad de agregados gruesos. [26]

Luego de finalizar el tratamiento de remediación, se determina si el suelo tratado presenta algún tipo de contaminación, de ser así, este material puede ser sometido a otro ciclo de lavado o a otro tratamiento para remover la contaminación restante. Por el contrario, si el suelo no presenta ningún indicio de contaminación este podrá ser utilizado como relleno. En cualquiera de los casos, es importante tener un tratamiento para el agua de lavado resultante del proceso, con el fin de poderla reutilizar o desechada adecuadamente. [26]

La técnica de remediación, lavado de suelo, es una opción económica para la remoción de contaminantes en el suelo; además permite controlar condición tales como pH y temperatura, y es una técnica aplicable tanto in-situ como ex-situ. [24]

Actualmente, existen sistemas móviles para el lavado de suelos que se pueden transportar al sitio contaminado, disminuyendo costos y el riesgo de dispersar los contaminantes durante el transporte (Van Deuren et al. 2002).

A continuación en la tabla 6. se muestran las ventajas y desventajas del tratamiento de remediación.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de la técnica de remediación Lavado de Suelo.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo Costos. • Efectivo para tratar suelos arenosos o muy permeables. • Disminuye la cantidad de material contaminado. • No requiere de infraestructura sofisticada. • Son sistemas cerrados, en donde se pueden controlar las condiciones del sistema y las emisiones al ambiente. • Es un procedimiento muy rápido en comparación con los tiempos empleados por otros métodos de remediación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere excavar y manipular el suelo. • Altas cantidades de materia orgánica dificultan el proceso de separación. • No es eficiente para tratar mezclas complejas. • Los contaminantes deben ser solubles. • Requieren de gran cantidad de agua. • Se necesitan procesos secundarios para tratar aguas residuales y partículas finas de suelo.

Fuente: Van Deuren et al. 2002; US EPA, 2001

La principal ventaja que posee la técnica de remediación es que reduce la cantidad de suelo que requiere de una limpieza más profunda, lo cual hace disminuir los costos de limpieza; “el lavado de suelo puede ser una opción útil cuando se posee un suelo muy contaminado, por el contrario, puede llegar a ser poco efectivo, en cuanto a costos, cuando se tiene una contaminación baja y un suelos que contenga grandes cantidades de limo y arcilla”. (Van Deuren et al. 2002)

El tiempo que demora la técnica en remover la contaminación del suelo, según la *Environmental Protection Agency (EPA)* en sus guías para el ciudadano sobre lavado de suelo, dependerá de varios factores; uno de estos será la cantidad de limo, arcilla y escombros que haya en el suelo a tratar, en segundo lugar el tipo y la cantidad de contaminación; y finalmente, el tamaño de la unidad de lavado. Los factores anteriormente nombrados, hacen referencia a unidades de lavado de suelo móviles, que efectúan el proceso de remediación in-situ.

Un ejemplo claro del uso de la técnica lavado de suelo para remediar suelos contaminados con hidrocarburos, se puede observar en la empresa MEMCAP S.A (Consultora Argentina del Petróleo). La cual toma las tierras empetroladas y la deposita en una maquina lavadora con la que remueve la contaminación agitando la mezcla surfactante – agua caliente – suelo.

El proceso de remediación da inicio al momento de incorporar los detergentes, que junto con el agua caliente ayudaran a remover o separar el hidrocarburo del suelo contaminado. Luego de una hora de lavado, es posible encontrar dentro de la máquina tres productos por separados (Agua – Suelo – Petróleo). En el paso a seguir se logra separar y seleccionar los productos, todo esto a través de decantación.

Luego de decantar la suspensión, se separa el agua y el petróleo en una pileta, dejando en el recipiente anterior el suelo limpio, el cual es enviado a una zona de secado; luego se separa el petróleo del agua, por medio de rebalse y se envía el

petróleo a la empresa petrolera y el agua a la máquina de lavado para iniciar un nuevo proceso, teniendo así una recirculación del 90 %.

Existen diversas formas de realizar o aplicar la técnica de remediación lavado de suelo; el siguiente ejemplo, tomado de la tesis de grado del estudiante Bernardo Vásquez Bravo de la Universidad de las Américas, Puebla, muestra cómo a escala laboratorio se desarrolla esta técnica físicoquímica, con el objetivo de estudiar los cambios en el comportamiento de un suelo que ha sido expuesto a un tratamiento de restauración por medio del lavado con surfactantes, considerando sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

El proceso de lavado ejecutado en este proyecto, durante 1.5 horas con ayuda de un motor que incluía una flecha de acero y un tanque de mezcla, se efectuó con 600 ml de mezcla de surfactante no ionico Nonil fenol poe = 10 y agua al 0.5% y una relación 1:3 entre suelo y agua.

Terminadas las 1.5 horas, la suspensión fue puesta a sedimentar durante 24 horas, luego se separó el suelo sedimentado y se pasó a una zona de secado, para finalmente realizar las pruebas correspondientes a los objetivos del proyecto.

Como se había mencionado antes, la técnica lavado de suelo presenta muchas ventajas, entre ellas su aplicabilidad tanto in-situ como ex-situ; con los ejemplos antes mencionados fue posible observar como en algunos lugares se utilizan grandes maquinarias para descontaminar volúmenes considerables de suelos, y como en otros lugares se utilizan pequeñas herramientas y maquinarias para la aplicar la técnica y así, generar más investigación en torno a los resultados obtenidos.

2.9.1 Lavado de suelo en columnas. El uso de columnas en la aplicación de la técnica de remediación lavado de suelo, es un método soportado bajo normas

internacionales las cuales pretender estandarizar los diseños en este tipo de investigaciones.

Dentro de las recomendaciones aportadas por la norma DINV 19736 (Instituto Alemán de normalización), se plantean los materiales más óptimos de los cuales puede estar elaboradas las columnas, en este grupo se tienen: vidrio, cuarzo, acero inoxidable o PTEF, por otro lado se recomiendan algunas dimensiones adecuadas para estas entre las que se incluyen : - Longitud útil = 32 cm - Diámetro interno \geq 5 cm - volumen útil en la columna \geq 620 ml o de manera general, tener una relación longitud-diámetro no inferior a 3; finalmente establecen tener dos filtros dentro de la columnas (Superior – inferior) los cuales posean orificios de 2 mm y que el caudal inyectado se mueva de forma ascendente dentro de la columna.

Una investigación en la que se puede observar claramente el uso de columnas en la técnica lavado de suelo, es la desarrollada por el estudiante Josué Méndez Estéban y el Investigador, Dr. Francisco Javier Rodríguez de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; en este trabajo investigativo el cual titula “extracción de hidrocarburos en suelos contaminados mediante el acoplamiento del lavado de suelo implementando un sistema en columna” se implementó un sistema en columna con dimensión de 75 cm de altura y 5 cm de diámetro; construida a partir de PVC. El flujo inyectado a la columna era impulsado con ayuda de una bomba peristáltica, la cual conducía el flujo al mismo recipiente, al salir de la columna, con el propósito de hacer circular la mezcla.

La sustancia utilizada para remover los hidrocarburos fue una mezcla de Multiagro (Dosis al 1% de humos liquido de lombriz con nutrientes) y agua, paralelo a esto se realizó una prueba con un surfactante sintético (Ácido dodecibenceno sulfónico) y una tercera solución, solo agua; todo con el fin de comparar resultados.

Finalmente, se tuvo como conclusión que la sustancia más eficiente fue la solución humus, la cual demostró un aumento de DQO con respecto a la inicial a comparación de la solución con surfactante y solo agua.

En el artículo publicado por la investigadora Susana Sava del Instituto de Ingeniería de La UNAM, y el cual titula “una experiencia de caracterización y remediación de un suelo arcilloso contaminado con hidrocarburos” se aplicó una remediación química con agentes tensoactivos comúnmente conocida como “flushing”; previo a realizar esta actividad in-situ, se efectuaron pruebas de laboratorio, las cuales consistían en aplicar 4 agentes tensoactivos diferentes a una muestra de suelo extraída del predio que se iba a remediar, utilizando columnas de vidrio de 3 cm de diámetro y 40 cm de longitud. En esta parte de la investigación simplemente se pretendía elegir el mejor tensoactivo teniendo en cuenta la concentración de hidrocarburos en el agua de salida de las columnas, con el fin de determinar el porcentaje de remoción y así trabajar con este surfactante en campo.

Luego de realizar el lavado, el volumen de agua que salía de las columnas fue sometido a biorremediación, utilizando cultivos de bacterias degradadoras de diesel y gasolina desarrolladas en el laboratorio.

Los procesos de remediación en columna no solo se ven enfocados para la remoción de hidrocarburos en el suelo; en el trabajo investigativo titulado “Flujo de microemulsión, gasolina en agua (LG/W), a través de columnas saturadas” realizado por el departamento de ciencias de agua y suelo de la universidad de Florida (USA); se logró el objetivo, investigar el flujo de microemulsión (LG/W) a través de una columna saturada de agua y su influencia sobre el transporte de gasolina y alquilos de plomo; al igual que evaluar la eficiencia del lavado de un suelo contaminado con gasolina plomada con una solución salina y una mezcla de agua, surfactante y cosurfactante, entre otros objetivos.

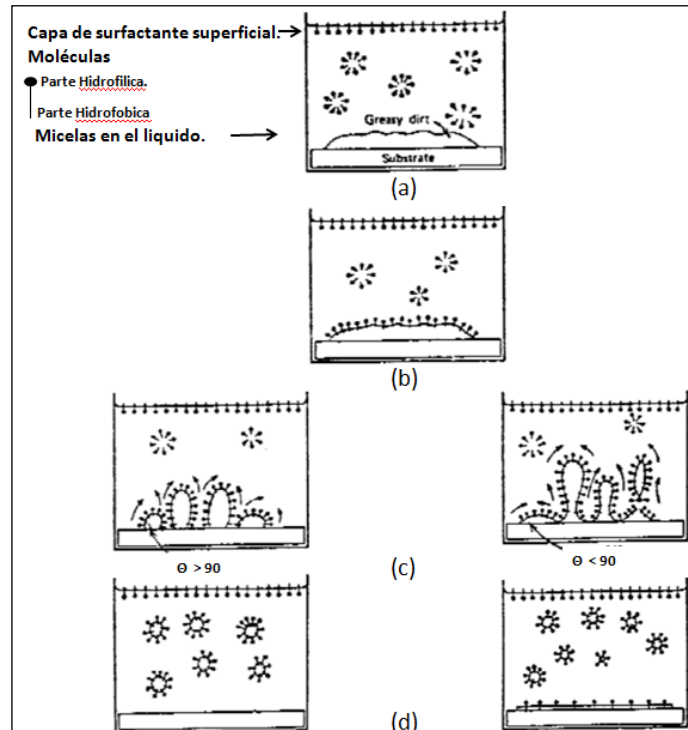
Terminado el proceso de lavado, para el cual previamente fue necesario realizar actividades de llenado de columnas y preparación de soluciones, se demostró que la mezcla agua–surfactante–cosurfactante tiene una alta capacidad de remoción de gasolina y plomo de las columnas de suelo contaminado.

2.10 SURFACTANTE.

Los agentes tensoactivos o surfactantes son moléculas conformadas por una parte hidrofílica (miscible en agua) y otra hidrofóbica (no miscible con el agua), esta última parte está compuesta por cadenas de hidrocarburos que contiene 12 o más átomos de carbono. Por otro lado, la parte hidrofílica se compone de átomos con cargas ya sean formales o parciales. (Castillo-Espinoza, 2008).

Al generarse un contacto entre la grasa y la solución de tensoactivo, el efecto solubilizador de este, hace que los extremos hidrofóbicos de las moléculas se disuelvan en la grasa, luego de esto, el tensoactivo modifica el ángulo de contacto θ entre la suciedad y el sustrato; en casos en que θ es menor a 90° se hace difícil realizar una eliminación total de grasas; por esta razón, se somete la mezcla a agitación con el fin desplazar la suciedad (grasa) en forma de partículas macroscópicas. [27] (Ver Ilustración 10)

Ilustración 10. Efecto solubilizador de los surfactantes



Fuente: Industria de los agentes tensoactivos; Escuela de ingenierías industriales UVa

En la actualidad los surfactantes, desde el punto de vista comercial, se clasifican según sus usos (jabón, detergente, emulsionante, bactericida, inhibidor de corrosión, dispersante, tensoactivo, humectante, etc.); aun así, existe una clasificación más puntual que se basa en el tipo de molécula que posee, más exactamente, en el tipo de disociación de su molécula en solución. [27]

2.10.1 Surfactantes no iónicos. Son aquellas moléculas cuya parte hidrofílica está conformada por grupos polares no ionizados tales como: alcohol, tiol, éter o éster etc., debido a esto, no forman iones en soluciones acuosas. Estos surfactantes no forman sales con los iones metálicos y aún son igualmente

efectivos en aguas blandas o duras. Así mismo, son utilizados como materia prima para la formulación de numerosos productos industriales ya que, estos surfactantes son compatibles con otros tensoactivos sin importar si son aniónicos o catiónicos. [27]

2.10.2 Surfactantes iónicos. Son aquellos que en solución acuosa se disocian en un anión anfífilo y un catión, de igual forma al tener gran afinidad con el agua son capaces de arrastrar consigo las cadenas de hidrocarburos. A este tipo pertenecen los surfactantes de mayor producción: detergentes como alquilbenceno sulfonatos, jabones o sales de ácidos carboxílicos grasos, espumantes como el lauril éster sulfato etc. [27]

Esta categoría de surfactantes iónicos se subdivide a su vez en tres grupos; los aniónicos, quienes se caracterizan por tener una cadena ramificada que contiene de 10 a 14 átomos de carbono y en su extremo poseen un anión; los catiónicos son aquellos que forman iones en solución acuosa, lo cual hace que la parte hidrofóbica quede cargada positivamente; finalmente los anfotéricos, son aquellos que en un medio básico pueden actuar como aniónicos y en un medio ácido pueden actuar como catiónicos. [26]

2.10.3 Biosurfactantes. Son moléculas emulsionantes, dispersantes y solubilizantes producidas por microorganismos (Principalmente cepa de bacterias y levaduras), capaces de mejorar el uso de sustratos hidrofóbicos, con el fin de lograr la remoción de los hidrocarburos en el suelo. [36]

Los biosurfactantes tienen la capacidad de modificar las propiedades de un medio líquido o su interfase, reduciendo la tensión superficial (Desai y Banat, 1997; De Jonghe et al., 2005), estos poseen una porción hidrofílica que puede estar constituida por monosacáridos, oligosacáridos, polisacáridos, aminoácidos,

péptidos, grupos fosfatos o carboxilados y una porción hidrofóbica compuesta por un ácido graso saturado o insaturado.

Su baja toxicidad, el ser biodegradables y su amplia variedad de estructuras químicas disponibles, son algunas de las ventajas que estos poseen ante los surfactantes químicos (Ver tabla 7) ; los biosurfactantes se clasifican teniendo en cuenta su peso molecular, teniendo así, de bajo peso molecular (lipopéptidos, glicolípidos, aminoácidos modificados y ácidos grasos), los cuales reducen en mayor proporción la tensión entre fases; y de alto peso molecular (polímeros compuestos por polisacáridos, lipopolisacáridos, proteínas, lipoproteína o una mezcla compleja de estos biopolímeros), aunque no son muy eficientes a la hora de reducir la tensión entre fases, se consideran los mejores emulsificantes. [36]

A continuación en la Tabla 7. se presentan las ventajas y desventajas de los biosurfactantes.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los Biosurfactantes.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Son biodegradables • Menos tóxicos que los sintéticos • Las moléculas de superficie se adaptan • a los cambios de sustrato de crecimiento • Tienen estructuras definidas. • Mejora la degradación del hidrocarburo • Se le atribuye el aumento de solubilidad y biodisponibilidad. • o Son amigables al medioambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • La producción a gran escala de biosurfactantes es compleja y difícil • Algunos biosurfactantes pueden ser tan tóxicos como los sintéticos. • Pueden competir con el hidrocarburo como sustrato preferencial. • La producción de biosurfactantes no es económicamente viable

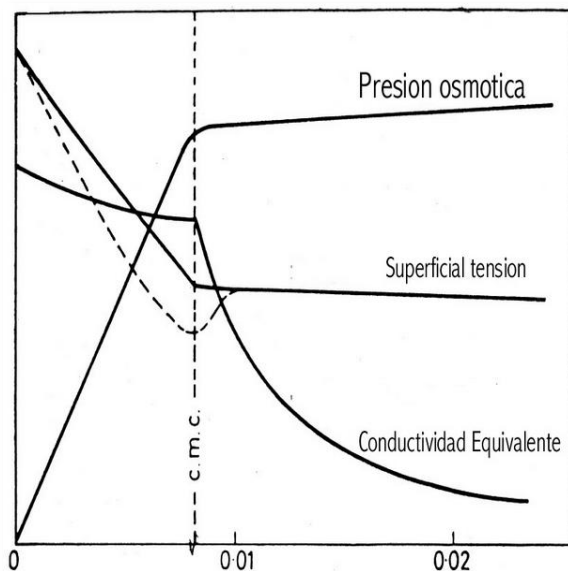
Fuente: Autor.

2.11 CONCENTRACIÓN MICELAR CRÍTICA.

La CMC de un tensoactivo es aquella concentración a la que el surfactante llega a su fase de saturación en solución acuosa y forma agregados al interior del líquido, resultando una estructura con orientación específica de alto peso molecular; a partir de esta concentración, se generan cambio significativos en sus propiedades fisicoquímicas tales como conductividad, presión osmótica, turbidez y tensión superficial. [43] (Ver Ilustración 11)

A continuación se muestra la variación de las propiedades fisicoquímicas luego de superarse la Concentración Micelar Crítica.

Ilustración 11. Variación de las propiedades fisicoquímicas al superarse la CMC.



Fuente: Pagina web Facultad de química UNAM URL: <http://depa.fquim.unam.mx/~tunda/FORMACION%20MICELAR.html>

La identificación de la CMC de un surfactante, previo a realizar un proceso de remediación de suelos, es un paso importante ya que da a conocer el punto

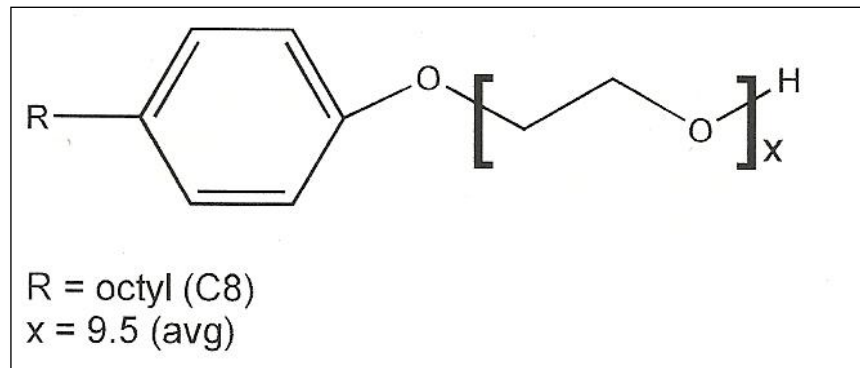
específico en el que los compuestos contaminantes se solubilizan más fácilmente al interior hidrofóbico de las micelas, a causa del rompimiento de la tensión interfacial entre la fase sólida y líquida permitiendo así, una mayor solubilidad de los compuestos contaminantes en el agua y a su vez una mejor extracción de éstos. [43]

El valor de la CMC es característico para cada surfactante, y puede determinarse experimentalmente mediante la técnica del anillo, empleando un tensiómetro. (William y Hubert, 1930; Attwod y Florence, 1983)

2.12 TRITÓN X-100

El tensoactivo Tritón X-100 o octilfenol etoxilado, es un surfactante no iónico compuesto por un grupo de óxido de polietileno, hidrofílico, y un grupo de hidrocarburos, lipofílico ó hidrofóbico. [37] (Ver ilustración 12)

Ilustración 12. Estructura Molecular del Surfactante TRITON X-100.



Fuente: Hoja de seguridad Tritón X-100 - LatexPort

Este producto se destaca por ser un excelente detergente, también es un dispersante y emulsificante de aceites en sistemas de agua; presenta un

desempeño efectivo a diversos rangos de temperatura y finalmente es un excelente agente humectante. [37]

El tritón X-100 es considerado un agente 100% activo y biodegradable en forma líquida, puede ser empleado como producto de limpieza industrial y del hogar; también es utilizado en la fabricación de pinturas de revestimiento. [37]

En la Tabla 8 se presentan las características físicas del tritón X-100

Tabla 8. Características físicas del surfactante TRITÓN X-100

Apariencia	Transparente, líquido.
Punto de nube (1% Solución acuosa)	66 °C
HLB	13.4
pH (5% Solución acuosa)	6
Viscosidad (25°C)	240 cP
Densidad 25 °C	1.061 g/mL
Solubilidad y compatibilidad	Soluble en agua – Miscible en muchos solventes orgánicos polares e hidrocarburos aromáticos – Insolubles en hidrocarburos alifáticos – Compatible con surfactantes aniónicos y catiónicos.
CMC (agua destilada a 25°C)	130 ppm

Fuente: Hoja de seguridad Tritón X-100 – LatexPort

La serie X de estos surfactantes es producida a partir del octilfenol polimerizado con óxido de etileno, el número 100 es relacionado sólo indirectamente con el número de unidades de óxido de etileno. En la estructura tiene en promedio 9.5

unidades de óxido de etileno por molécula, con un peso molecular promedio de 625 g/mol, el cual puede variar dependiendo de las condiciones de la manufactura (JIMENEZ GONZALES, Angélica1999).

2.13 TRATAMIENTO PARA EL AGUA DE LAVADO.

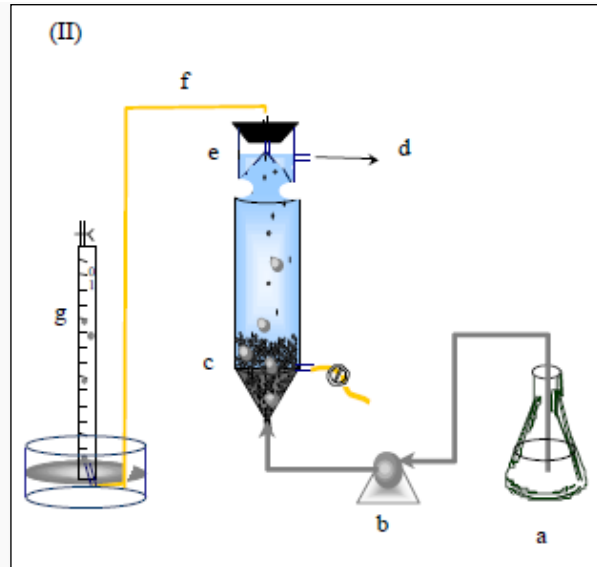
Entre las desventajas que posee la técnica de remediación lavado de suelo, se incluye la necesidad de implementar procesos secundarios para remover o destruir los contaminantes extraídos del suelo. Una vez terminado el proceso, el efluente generado contendrá parte de la contaminación removida y parte del surfactante con el cual se aplicó la técnica, por lo tanto, se debe implementar un método para remover estas sustancias.

Uno de los métodos utilizados para remover la contaminación del agua se basa en aplicar técnicas convencionales de separación (agua-aceite), con el fin de extraer el contaminante del agua de lavado y así utilizar esta en otro lavado. Otro método semejante a éste, aunque para aguas provenientes de lavado de suelo contaminado con metales; se basa en aplicar un tratamiento electroquímico con el cual se extrae el metal puro, que puede ser utilizado nuevamente, quedando la solución de extractante, la cual puede usarse para el lavado de otra fracción del suelo contaminado. [35]

Un método alternativo para remover esta contaminación en el agua de lavado, es empleando métodos de biorremediación como el utilizado en la tesis de grado “tratamiento anaerobio de un surfactante no iónico y los efluentes del lavado de un suelo contaminado con hidrocarburos”, (Ver Ilustración) en la cual se realizó un tratamiento anaerobio a los lixiviados de un lavado de suelo el cual contenían hidrocarburo y surfactante Tritón X-100.

A continuación en la ilustración 13 de se presenta el esquema del reactor UASB

Ilustración 13. Tratamiento Anaerobio a Lixiviados de un Proceso de Lavado de Suelos.



Fuente: Tesis de grado -TRATAMIENTO ANAEROBIO DE UN SURFACTANTE NO IÓNICO Y LOS EFLUENTES DEL LAVADO DE UN SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS

(II)	REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL REACTOR UASB
(a)	<i>Recipiente de alimentación.</i>
(b)	<i>Bomba peristáltica.</i>
(c)	<i>Lecho de lodos.</i>
(d)	<i>Efluente.</i>
(e)	<i>Campana de separación Gas/Líquido.</i>
(f)	<i>Salida de biogás.</i>
(g)	<i>Columna de desplazamiento del biogás.</i>

3. DIAGNOSTICO DE LA ZONA CONTAMINADA.

El impacto ocasionado por la contaminación y deterioro del ambiente, a causa de los derrames de hidrocarburos, no solo se ve reflejado en las características bióticas y abióticas de un entorno natural; dichos impactos logran afectar y modificar aspectos como la salud humana, la economía y el desarrollo de las comunidades.

Un punto clave a la hora de proponer ideas y soluciones para contrarrestar los impactos generados por la contaminación, es conocer en detalle el entorno sobre el cual se trabaja; es por esto que para el presente proyecto se realizó un diagnóstico de la zona en estudio teniendo en cuenta antecedentes y condiciones actuales del sitio a trabajar e información básica y detallada de la zona de influencia indirecta.

La información que se recolectó en la primera fase del proyecto fue proporcionada por el Instituto Colombiano de Petróleos y tomada de documentos realizados por testistas que han trabajado sobre este predio contaminado; con esta información fue posible conocer actividades tales como:

- ✓ Acciones de contingencia luego de ocurrido el derrame.
- ✓ Instalación de pozos exploratorios y de monitoreo. (PM1 a PM19).
- ✓ Estudios de agua subterránea y medición de vapores en el área de Landfarming del campo Palagua.
- ✓ Estudio hidrogeológico de la zona impregnada de hidrocarburos.
- ✓ Evaluación bajo el esquema de Acción Correctiva Basada en Riesgo (metodología RBCA).

- ✓ Desarrollo del modelo del flujo de agua subterránea con ayuda del software MODFLOW

Luego de realizarse la revisión bibliográfica relacionada con las características del predio contaminado, se llevó a cabo un reconocimiento físico del área, con el propósito de corroborar la información encontrada en los documentos y con el objetivo de recoger la muestra de suelo que se utilizó en la caracterización físico-química y en el proceso de lavado.

Basados en la información proporcionada por el ICP y lo observado en la visita a campo, se realizó un diagnóstico de la zona contaminada en el cual se presentan aspectos del área tales como: ubicación de la zona, condiciones geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y topográficas; trabajos de recuperación luego del derrame, descripción de perfiles litológicos, entre otros.

A continuación se presenta el diagnóstico realizado a la zona contaminada, Campo Palagua – Puerto Boyacá.

3.1 INFORMACIÓN GENERAL.

El área de influencia del proyecto es una zona perteneciente a la empresa COPETROL S.A, la cual tiene como objetivo social la explotación, producción, refinamiento y comercialización del petróleo, gas natural y gas licuado de petróleo producido en Colombia. Esta área de influencia está ubicada a 7 km en línea recta del municipio de Puerto Boyacá, departamento de Boyacá, en una zona de extracción de crudo de aproximadamente 800 m² nombrada como Campo Palagua. Dentro de la zona antes mencionada, se encuentra el área de influencia

directa (AID), la cual es conocida como Bajo2 y se localiza en el predio aledaño a la estación 1.

3.2 ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El predio aledaño a la estación 1, Bajo2 (AID), es una zona que ha presentado contaminación por hidrocarburos desde el año 1997, debido a un accidente ocurrido en la Batería 1, que provocó un derrame de crudo controlado momentáneamente, a través de confinamiento y relleno con materiales de construcción tales como grava y escombros. Seguido de esto, se realizaron diversas actividades, año a año, con el fin de controlar y monitorear el desastre ocurrido. [23]

Algunas de las actividades realizadas dentro del área de influencia se describen a continuación.

En el año 2000, se construyeron siete pozos de monitoreo (PM-1 a PM-7), con los cuales se inició un estudio de aguas subterráneas para medir, determinar y controlar la contaminación presente en el agua subterránea de la zona; de igual forma, se realizaron caracterizaciones del subsuelo y del agua subterránea a través de los pozos, para determinar la presencia de producto libre en Campo Palagua. Terminadas estas actividades, el resultado arrojado por los estudios ambientales, determinó la presencia de una pluma contaminante en el predio aledaño a la Estación 1. [23]

Por otra parte, mediante el Software Visual MODFLOW se conoció el comportamiento del flujo en el subsuelo teniendo en cuenta los datos obtenidos durante la realización de los pozos de monitoreo. [23]

Durante el año 2001, se llevaron a cabo muestreos físico-químicos del agua subterránea en los pozos de monitoreo; los resultados arrojados en estos análisis, indicaron la presencia de fenoles a una concentración que sobrepasaba la norma de agua potable (0.03 mg/l), pero al mismo tiempo, no la superaba para agua residual (0.2 mg/l). Además de estos resultados, también se observó en el pozo de monitoreo PM-1, la presencia de una capa sobrenadante de producto libre con un espesor de 3.5cm y presencia de BTEX a una concentración de 228,368 ppb. [23]

Paralelo a esto, se realizó medición de vapores para seis puntos del área de Landfarming de Campo Palagua, los cuales arrojaron concentraciones bajas en cada análisis. Además de estas mediciones, se instalaron seis pozos de control provisionales, a los cuales también se les realizó monitoreo. [23]

Para el año 2002, se efectuó nuevamente un análisis físico-químico al agua subterránea en los pozos de monitoreo y los seis pozos provisionales instalados en el 2001; los resultados arrojados por estos análisis concluyeron, en la no presencia de BTEX y se observó que el producto libre en el PM-1 aumento a 9.1 cm de grosor. [23]

Durante el año 2003 se llevó a cabo la construcción de nueve pozos de monitoreo (PM-8 al PM-16) y adicional a esto, se realizaron cuatro perforaciones exploratorias. [23]

Con ayuda del esquema de Acción Correctiva Basada en Riesgos (RBCA), en el año 2005, se evaluó la situación de la Estación 1 y se concluyó que no existe una fuente activa de contaminación que afecte a las personas que trabajan en el área y a los ecosistemas circundantes o cuerpos de agua cercanos

Para determinar la amplitud de la pluma contaminante en el área Estación 1 y predio aledaño, se realizó un estudio hidrológico detallado de la zona. Adicional a esto, se llevó a cabo una prospección geofísica con el fin de determinar anomalías

que se pudieran asociar con posibles contaminantes tanto a nivel de suelo como de agua. [23]

Con el objetivo de tener una mayor precisión en la dirección del flujo subterráneo en el área y predecir la extensión de la pluma contaminante ya encontrada, se realizó en el año 2008, un modelo matemático con el software MODFLOW y la aplicación “Pathline”, el cual arrojó un resultado idéntico al obtenido en el año 2000; de igual modo, los resultados del modelo fueron consistentes con los monitoreos de seguimiento, que coinciden con la presencia de producto libre detectado en los apiques exploratorios. [23]

Actualmente se sigue monitoreando el movimiento de la pluma contaminante y la concentración de hidrocarburos y otros compuestos químicos presentes en el suelo, esperando implementar alternativas de remediación para la remoción de hidrocarburos y recuperación del suelo.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA.

Como se había mencionado anteriormente los procesos de remediación no solo deben estar centrados en la aplicación de métodos de remoción en cualquier zona contaminada, también se deben tener en cuenta el entorno en el que se presenta la contaminación. Debido a esto, es de vital importancia conocer las características del medio, con el fin de analizar la posible interacción de estas, con la contaminación presente en la zona.

Los aspectos geológicos, topográficos e hidrológicos, característicos del área de influencia, que han sido determinados luego de generarse el accidente contaminante, han ayudado a conocer las direcciones en las que la pluma contaminante puede moverse dentro del área de influencia; paralelo a esto, los análisis de caracterización físico-químicos, tanto del suelo como del agua

subterránea, han permitido determinar los niveles de contaminación presente en el área y como éstos pueden afectar las poblaciones y ecosistemas cercanos.

3.3.1 Aspectos Geológicos. Los estudios geológicos encontrados para el municipio de Puerto Boyacá, indican que este, está conformado por tres unidades litológicas: Rocas sedimentarias de la formación mesa de edad plioceno, depósitos aluviales cuaternarios y rocas que afloran al Oeste y Este de la falla de Cambras. [23]

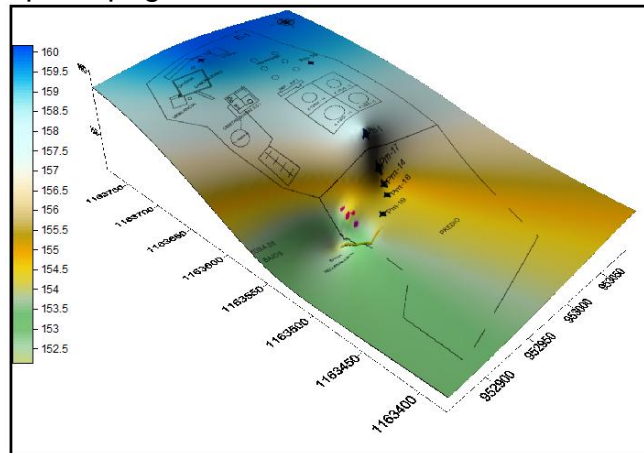
Por otro lado, según un informe técnico desarrollado por la firma Hidrogeocol LTDA en los años 2000 y 2003, se determinó en la zona de estudio, un afloramiento de sedimentos del cuaternario que conforman terrazas aluviales, las cuales constan en general, de paquetes de arenas de grano medio a fino con la laminación plana, laminación inclinada ascendente, ondulada y artesana, que son formadas por la actividad hídrica de la zona. [23]

En cuanto al área de influencia, los niveles litológicos identificados en la Estación 1, demostraron la presencia de arenas, arcillas, gravas, arenas arcillosas y limosas que conforman un depósito aluvial. Dentro del área de influencia directa, bajo2, los análisis litológicos demostraron la existencia de un manto impermeable que impide el contacto entre el agua superficial y el nivel saturado bajo éste. [23]

3.3.2 Aspectos Topográficos. La topografía de la zona fue determinada a partir de un levantamiento topográfico realizado en el año 2010, con el cual, se pudo posicionar el terreno sobre la superficie de la tierra. De igual forma, con las cotas de los pozos y algunos elementos específicos dentro del área, se diseñó en el mismo año, un mapa topográfico en 3D a través del software Surfer. [23]

En la Ilustración 15 se muestra el mapa topográfico diseñado en el software Surfer.

Ilustración 144. Mapa Topográfico 3D – Software Surfer



Fuente: LEAL, Carolina; Planteamiento de alternativas físico-químicas para remediación de agua subterránea y suelos contaminados con hidrocarburos apoyados mediante la aplicación de software visual modflow para un área de interés de Ecopetrol s.a.

3.3.3 Aspectos Hidrológicos. El municipio de Puerto Boyacá posee una hidrología conformada por el Río Magdalena, Río Guaguaquí, Río Negro, Río Ermitaño, Serranía de Las Quinchas, Quebrada Velásquez y la Ciénaga Palagua; siendo esta última uno de los cuerpos de agua más importantes dentro de la zona, junto con el Río Magdalena. [23]

La ciénaga de Palagua, ubicada en el municipio de Palagua a 5 km del margen oriental del río Magdalena, a 28 km del municipio de Puerto Boyacá y a 1.2 km de la batería 1 de campo Palagua, es el punto principal de drenaje de la zona de estudio y forma parte de las actividades petroleras de la zona. [23]

Estudios realizados en el año 1992 demostraron que la Ciénaga Palagua presentaba metales pesados y contaminación por hidrocarburos; ante esta situación, se implementó un plan de restauración de la zona y se prohibieron los vertimientos a este cuerpo lentic, logrando así, que para el año 2005 la ciénaga presentara niveles de contaminación más bajos que lo registrados anteriormente.

3.4 SUELOS.

Las características físico-químicas de un suelo están determinadas básicamente por el material parental, el tiempo, la topografía, la acción de los micro y macro organismos, el clima y en algunos casos por las actividades antropogénicas. [2]

Las propiedades fisicoquímicas del predio aledaño a la estación 1, fueron determinadas en el año 2010, con el fin de iniciar la elaboración del modelo matemático MODFLOW para determinar la proyección de la pluma contaminante en el predio. [23]

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización se relacionan en la Tabla 13

Tabla 9. Propiedades físico-químicas del suelo - Campo Palagua.

Parámetro Físicoquímico	Valor Registrado	Observación
Permeabilidad	19.98 cm/h	Permeabilidad e infiltración alta, clasificando el suelo como franco arenoso
Temperatura	28 °C	
Densidad Aparente	1.41 g/cc	
Estructura	-	Suelo Granular
Textura	92.2% de Arena 7.3% de Arcilla 0.5% de Limo	Suelo Arenoso
Porosidad	50.4%	Suelo disgregable con alto

		contenido de materia orgánica
Densidad Real	0.95 gr/ml	
pH	7.28 pH(H ₂ O) 6.46 pH(KCL1N) -0.82ΔpH	pH ligeramente ácido, clasificando el suelo como intercambiador catiónico.
Humedad Gravimétrica	4.74%	La masa de agua contenida en los poros del suelo es muy baja.
Humedad Volumétrica	6.7%	El contenido de agua almacenado en el suelo es bajo.
CIC	12.6 meq/100gr	CIC media
Contenido de Materia Orgánica	< 20%	Suelos con alto contenido de minerales.

Fuente: LEAL, Carolina; Planteamiento de alternativas físico-químicas para remediación de agua subterránea y suelos contaminados con hidrocarburos apoyados mediante la aplicación de software visual modflow para un área de interés de Ecopetrol s.a.; Bucaramanga 2010; P.89-110

3.4.1 Aspectos Hidrogeológicos. Partiendo de los análisis litológicos del suelo y el análisis de flujo de agua subterránea, se realizó un estudio hidrogeológico para evaluar la movilidad y dispersión de la sustancia contaminante tanto en el subsuelo como en el agua subterránea de la zona. [23]

Por otro lado, se efectuó una exploración geofísica a través de tomografías eléctricas con el fin de estimar la extensión de la contaminación presente en el área.

Otras actividades realizadas en la zona, y que fueron clave para estimar el impacto negativo causado por la interacción entre la contaminación y el medio contaminado, fue la determinación de las fuentes receptoras, con la que se estimó el riesgo y exposición de la contaminación para la población, flora y fauna

cercanos; y el monitoreo de niveles estáticos en los pozos, con el cual se pudo conocer la presencia o ausencia de hidrocarburos en la zona.

Para consultar el documento completo del diagnóstico de la zona contaminada, dirigirse al Anexo A.

4. METODOLOGÍA.

La metodología planteada para este proyecto se desarrolló en cuatro etapas; cada una de estas fueron soportadas con actividades que ayudaron a alcanzar los objetivos específicos propuestos y paralelo a esto, conseguir el objetivo general del trabajo investigativo.

Teniendo como punto de referencia lo anterior, en la presente investigación se analizó la variación de la concentración del surfactante Tritón X-100 con la técnica lavado de suelo, teniendo en cuenta la metodología que se presenta a continuación.

4.1 DIAGNOSTICAR LA ZONA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS.

Para tener un conocimiento claro de la situación actual de campo Palagua, fue necesario realizar un análisis completo de dicha zona; por tal motivo se llevaron a cabo las siguientes actividades.

4.1.1 Identificar los tipos de hidrocarburos que contiene la muestra de suelo.

Inicialmente se extrajo una muestra del suelo de Campo Palagua, suficiente para realizar el lavado de suelo y los análisis de laboratorio incluyendo, el análisis para determinar los tipos de hidrocarburos que la contenía.

4.1.2 Recopilación de datos sobre campo Palagua (Puerto Boyacá).

En esta actividad se tuvieron en cuenta todos los documentos relacionados con la zona contaminada que fueron proporcionados por el ICP; con los cuales se pudo

conocer la situación actual del predio y así poder realizar un diagnóstico de la zona estudiada.

4.1.3 Reconocimiento físico de campo Palagua y observación de la problemática descrita. Con la finalidad de corroborar la información encontrada en los documentos y recolectar la muestra para efectuar los análisis fisicoquímicos y el lavado de suelo, se realizó la visita a Campo Palagua y al predio aledaño a la estación 1 del mismo. (Pto. Boyacá – Boyacá).

4.2 DETERMINAR LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA EL USO DEL SURFACTANTE TRITÓN X-100.

En esta segunda fase del proyecto, se realizó un estudio minucioso y detallado de artículos y documentos relacionados con el surfactante TRITON X-100 con el fin de tener información acerca de la aplicación del surfactante en la técnica lavado de suelo, rangos de concentración usados y generalidades del tensoactivo. También, se determinaron las concentraciones a las que se trabajó el surfactante teniendo en cuenta los documentos encontrados y experiencia de docentes universitarios. Finalmente, se efectuaron las pruebas físico-químicas a la muestra extraída de campo Palagua, con el fin de conocer las características del suelo.

A continuación se presentan las actividades realizadas en esta fase del proyecto.

4.2.1 Conocer al detalle las características del surfactante comercial Tritón X-100. Por medio de artículos científicos y documentos comerciales se buscó toda la información acerca del surfactante TRITÓN X-100.

4.2.2 Determinar las concentraciones a las que se manejará el surfactante Tritón X-100. El desarrollo de esta actividad dio inicio al establecer el número de concentraciones a trabar en el lavado de suelo; luego de esto, se definieron los valores de las cuatro concentraciones, teniendo en cuenta la Concentración Micelar Crítica (CMC) del surfactante y basados en revisión bibliográfica encontrada.

4.2.3 Determinar las propiedades físico-químicas del suelo. Luego de obtener una información completa acerca del surfactante usado, se realizó un análisis fisicoquímico al suelo procedente de Campo Palagua, con el cual fue posible conocer las siguientes propiedades:

A continuación se muestran las propiedades fisicoquímicas analizadas y el método utilizado para ello.

Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas del suelo, métodos y ecuaciones.

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO.	MÉTODO UTILIZADO.	ECUACIÓN.
Contenido de Materia Orgánica.	Combustión húmeda de Walkley-Black	<p>Ecuación 1. Normalidad Solución Ferrosa. $N_{\text{solución Ferrosa}} = \frac{VK_2Cr_2O_7 \times NK_2Cr_2O_7}{V_{\text{solución Ferrosa}}}$</p> <p>Ecuación 2. Porcentaje de Carbono. $\%C = \frac{(B - M) \times N \times 0.003 \times 1.3 \times 100}{Pm}$</p> <p>Ecuación 3. Porcentaje Materia Orgánica. $\%MO = \%C \times 1.724$</p>
Densidad Real	Principio de Arquímedes	<p>Ecuación 4. Densidad Real. $D = M/V$</p>
Densidad Aparente	muestra de suelo sin disturbar, y el volumen del cilindro	<p>Ecuación 5. Densidad Aparente. $Da = \frac{\text{Peso.muestra} - \text{seca}(gr)}{\text{Volumen}(cc)}$</p>
Humedad Gravimétrica	Relacionado de la masa de agua, con la masa de suelo.	<p>Ecuación 6. Humedad Gravimétrica $\%HG = \frac{\text{Peso.muestra.húmeda} - \text{Peso.muestra.seca}}{\text{Peso.muestra.seca}} \times 100$</p>
Humedad Volumétrica	-	<p>Ecuación 7. Humedad Volumétrica. $\%HV = \%HG \times Da$</p>
Permeabilidad e Infiltración	Ensayo de Campo "Caída de Carga"	

Porosidad.	-	<p>Ecuación 8. Porosidad Total.</p> $\%Pt = \left[1 - \frac{Da}{Dr}\right] \times 100$
Textura	Método del hidrómetro o de Bouyoucos	<p>Ecuación 9. Porcentaje de Arena.</p> $\%Arena = 100 - \frac{1^{\text{a}} \text{ lectura. corregida. } 40'' \times 100}{pm}$ <p>Ecuación 10. Porcentaje de Arcilla.</p> $\%Arcilla = \frac{2^{\text{a}} \text{ lectura. corregida. } 2 \text{ horas} \times 100}{pm}$ <p>Ecuación 11. Porcentaje de limo.</p> $\%Limo = 100 - (\%Arena + \%Arcilla)$
Capacidad de Intercambio Catiónico	Método del acetato de amonio	<p>Ecuación 12. Capacidad de Intercambio Catiónico.</p> $CIC(meq. 100gr) = \frac{[(V - B) \times Nsoda] \times 100}{pm}$ $CIC(meq. 100gr) = \frac{(V - B) \times 0.1 \times 100}{5}$ $CIC(meq. 100gr) = 2(V - B)soda$ <p><i>V = Volumen de soda gastada en la muestra.</i> <i>B = Volumen de soda gastada en el blanco.</i> <i>N = Normalidad de la soda.</i></p>
pH	Método Potenciómetro. pHmetro marca Schot	<p>Ecuación 13. ΔpH</p> $\Delta pH = pH \text{ en KCL} - pH \text{ en Agua}$

Porosidad efectiva y del volumen de poro intercambiado.

Prueba de trazadores con ayuda de una solución de NaCl. [44]

Ecuación 14. $t_{0.5}$

$$t_{0.5} = \frac{\left(0.5 - \left(\frac{L_f}{L_{f0}}\right)_{n-1}\right) (t_n - t_{n-1})}{\left(\frac{L_f}{L_{f0}}\right)_n - \left(\frac{L_f}{L_{f0}}\right)_{n-1}}$$

Ecuación 15. Porosidad Efectiva.

$$n_{0.5} = \frac{Q \times t_{0.5}}{V}$$

Ecuación 16. Velocidad de Filtro.

$$V_f = \frac{Q}{A}$$

Contenido de nutrientes. Para conocer el Contenido de Nutrientes que presenta el suelo procedente de Campo Palagua, se envió una muestra a los laboratorios del Instituto Colombiano de petróleoos. En los análisis se incluyó la determinación de nitritos NO₂, nitratos NO₃, sulfatos SO₄ y COT Carbono Orgánico Total.

Concentración de TPH. La presencia de TPH's en el suelo fue determinada a través del método gravimétrico de grasas y aceites (G&A) (estimando estas sustancias por medio de la extracción con un disolvente de una muestra acidificada) en los laboratorios certificados del Instituto Colombiano de Petróleos.

Previo a realizar el lavado de suelo, se recolectaron 500 gr de muestra procedente de Campo Palagua en un frasco ámbar. La muestra almacenada fue preservada con ácido sulfúrico y se guardó en una bolsa de aluminio, se rotuló y llevó a las instalaciones del ICP, con el fin de conocer la concentración inicial de G&A en el suelo.

Luego de aplicar la técnica de remediación al suelo contaminado, la cual se implementó en un tiempo total de 4 meses, se tomaron dos muestras por cada columna (parte superior e inferior) y se homogenizaron por separado. Luego se almacenaron en frascos ámbar y se conservaron con ácido sulfúrico. Finalmente, se transportaron a los laboratorios del ICP teniendo en cuenta su respetivo rotulado.

4.2.4 Análisis físico-químico del agua. Con el fin de conocer las características del agua utilizada en el proceso de lavado y hacer un análisis más completo de la técnica aplicada, se determinaron los parámetros correspondientes a pH, temperatura y concentración de TPHs.

A continuación se explica cada uno de los parámetros determinados.

4.2.4.1 pH. El registro diario de pH en el agua de lavado, fue determinado a través de una cinta de pH marca FILTER-LAB, con el objetivo de detectar y analizar las posibles variaciones de este en cada columna durante los cuatro meses de lavado. De igual forma, se tomaron estos valores con el fin de hacer una comparación con el valor de pH obtenido antes de realizar la mezcla con el surfactante.

4.2.4.2 Temperatura. El parámetro de temperatura fue determinado a través de un termómetro de mercurio, antes de realizar la mezcla surfactante-agua, utilizada en la técnica de remediación.

4.2.4.3 Concentración de TPH. Los análisis para determinar la presencia de TPHs en el agua de lavado, fueron realizados por el Instituto Colombiano de Petróleos y la Universidad Pontificia Bolivariana en sus respectivos laboratorios certificados. Al igual que la muestra de suelo, el análisis de grasas y aceites fue el método que se utilizó para determinar este parámetro.

4.3 ESTABLECER LAS CONDICIONES DE DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “LAVADO DE SUELO”.

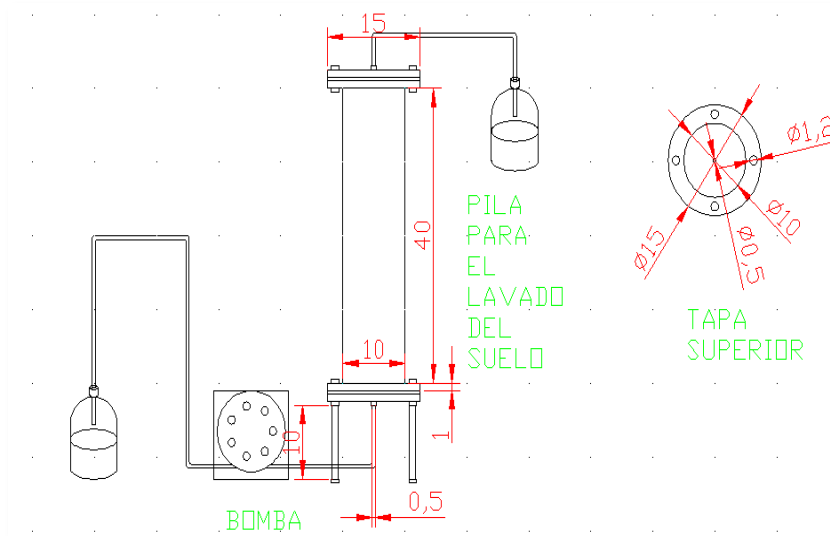
Durante esta fase del proyecto se llevo a cabo el montaje de las columnas en las cuales se realizó el lavado de suelo. Por otro lado, se establecieron las condiciones de diseño y operación, para lo cual se tuvo en cuenta factores tales como, caudal del agua de lavado, diseño de las columnas según normas internacionales y documentos científicos investigados.

Para esta fase del proyecto se ejecutó la siguiente actividad:

4.3.1 Diseño de columnas en las cuales se realizara el lavado de suelo. En el diseño de las columnas se tuvieron en cuenta artículos y documentos científicos basados en el lavado de suelos [32] [33]; también se utilizó como herramienta, el estudio en columna teniendo como referencia la norma DINV 19736 (Instituto Alemán de Normalización), ... Véase el numeral 2.9.1... con la cual se pretende estandarizar los diseños utilizados para este tipo de experimentos.

A continuación en la ilustración 15 se muestra un bosquejo del sistema en columna utilizado:

Ilustración 155. Esquema Sistema lavado de suelos.



Fuente: Autor.

4.4 EVALUAR LA EFICIENCIA DE LA TÉCNICA FÍSICO-QUÍMICA “LAVADO DE SUELO” CON EL USO DEL SURFACTANTE TRITÓN X-100 A DIFERENTES CONCENTRACIONES, PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO.

En la última fase planteada para la metodología de este proyecto, se evaluó la eficiencia de la técnica lavado de suelo tendiendo en cuantas las siguientes actividades.

4.4.1 Análisis químico del agua utilizada en el lavado del suelo. El análisis químico al agua de lavado, realizado por el ICP, se efectuó periódicamente y se determinaron en él, la concentración de TPH en el agua saliente de las columnas.

4.4.2 Análisis físico-químico al suelo utilizando en la técnica “Lavado de suelo”. Durante esta actividad, se determinó la cantidad de TPHs que contenía la muestra de suelo luego de terminar el proceso de lavado; la determinación de este parámetro, se realizó para una muestra de suelo superior e inferior en cada columna, con el fin de comparar cada resultado con el obtenido en la determinación de TPH realizada antes de efectuar el tratamiento de remediación.

4.4.3 Evaluar la eficiencia de la técnica lavado de suelo con el uso del surfactante TRITON X-100 a diferentes concentraciones. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las dos últimas actividades, se hizo un análisis y se presentó una serie de conclusiones acerca de la eficiencia de la técnica lavado de suelo a diferentes concentraciones.

Para esta actividad final, se tuvieron presentes los siguientes parámetros:

- Concentración de surfactante usado para el lavado de suelo.
- Concentración de TPH en el suelo.
- Tiempo de Remoción.
- Porcentaje de Remoción.

5. RESULTADOS.

Con base en la metodología planteada anteriormente se exponen a continuación los resultados obtenidos en cada una de las actividades desarrolladas durante éste proyecto.

5.1 DIAGNOSTICO DE LA ZONA CONTAMINADA.

La zona contaminada perteneciente a Campo Palagua presenta una contaminación por hidrocarburos desde el año 1997, ocasionada posiblemente por malas prácticas de operación y mal manejo del crudo.

Las actividades de recuperación que se desarrollan en la zona, han evitado un mayor desplazamiento de la pluma contaminante, y al mismo tiempo han permitido monitorear y controlar los niveles de contaminación presentes tanto en el suelo, como en el agua subterránea del predio contaminado.

En la determinación de las fuentes receptoras se logro identificar la Ciénaga Palagua, como el área ecológica más importante propensa a la contaminación por hidrocarburos; teniendo en cuenta que esta se ubicada a 1.2 km del área de estudio y es el principal punto de drenaje de la zona contaminada.

Con la información proporcionada acerca de los pozos de monitoreo construidos en la zona y los perfiles litológicos de estos, se identificó la zona más optima para extraer la muestra de suelo a la cual se le aplicó la técnica de remediación; Bajo esta idea se determinó, el pozo PM-14, como el área más adecuada para realizar las extracción, teniendo presente que la contaminación se ubica a 1 mt de profundidad.

Si bien los valores relacionados con la caracterización fisicoquímica del suelo, expuestos en el diagnóstico, no pueden ser comparados con los obtenidos en la caracterización del suelo de este proyecto; estos dieron una noción de los posibles resultados a encontrar en características tales como: textura, permeabilidad e infiltración, pH etc.

5.2 RECONOCIMIENTO FISICO DE CAMPO PALAGUA.

En la visita a campo efectuada durante la primera fase del proyecto, se identificaron los pozos de monitoreo con los cuales se realiza el control de la pluma contaminante en el área del derrame. (Ver Ilustración 16)

Ilustración 16. Pozo de monitoreo – Predio aledaño, Bajo2.



Fuente: Autor

Por otro lado, fue posible identificar afloramientos de crudo en varios puntos del predio aledaño a la batería 1, también, se corroboró toda la información encontrada en los documentos consultados para el diagnóstico de la zona.

Finalmente se recolectó la muestra contaminada, se almacenó herméticamente y transportó hasta las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana.

A continuación se describe el procedimiento de recolección de la muestra contaminada:

Luego de efectuar el estudio físico del medio sobre el cual se hizo la extracción de la muestra y en el que se identificaron áreas ecológicamente sensibles, al igual que condiciones del predio (Clima, topografía, vegetación, geología, altitud, elevaciones y depresiones), se tomó la muestra de suelo contaminado en un punto ubicado cerca al pozo de monitoreo PM-14; lo anterior, teniendo en cuenta que en esta zona era donde mayor crudo se observaba en la superficie e igualmente, guiados por pruebas litológicas que indicaban suelo arenoso en esta área del predio.

La muestra de suelo contaminada fue extraída de un apique realizado cerca al pozo de monitoreo PM-14 a una profundidad de 60 cm. Esta se almacenó en bolsas de plástico y se dispusieron en dos recipientes con sellado hermético, los cuales se etiquetaron correctamente y transportaron a los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana.

5.3 CARACTERÍSTICAS DEL SURFACTANTE TRITON X -100.

El surfactante usado para este proyecto, al igual que la información del mismo (generalidades, composición, identificación de peligros, manejos de seguridad, características, propiedades físicas, etc.), fueron proporcionados por la empresa LATEXPORT S.A, la cual se dedica a la fabricación y comercialización de productos de látex y utiliza en algunos de sus procesos este tensoactivo. Cabe mencionar que el Tritón X-100 utilizado era de uso industrial y se encontraba a una concentración del 100%

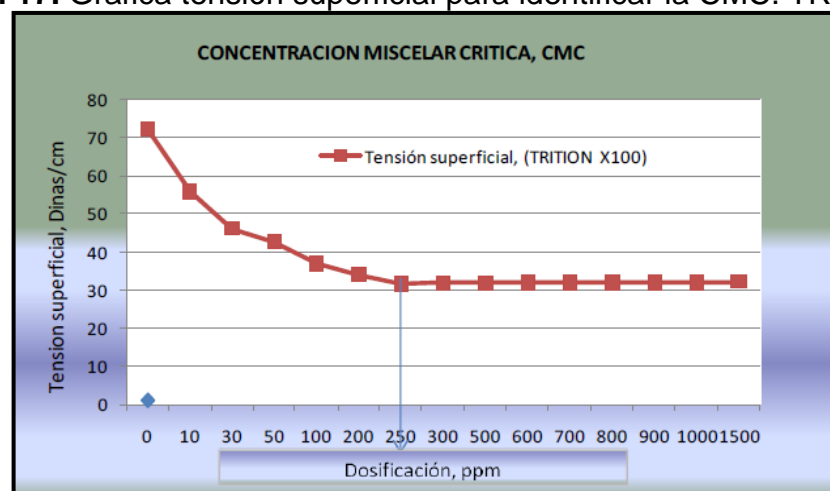
La información completa del surfactante Tritón X-100, puede ser consultada en el Anexo B

5.4 CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE TRITÓN X-100 USADAS EN EL LAVADO DE SUELO.

Una vez adquirido el tensoactivo y teniendo presente que el número de concentraciones a utilizar en el proceso de lavado serían 4, se envió una muestra de surfactante Tritón X-100 a los laboratorios del ICP, con el fin de determinar la Concentración Micelar Critica (CMC), y así, a partir de ésta, identificar los valores de las concentraciones a utilizar en la técnica de remediación.

Teniendo los resultados de la CMC, la cual se ubicó en 250 ppm (Ver Ilustración 17), se determinaron las cuatros concentraciones a trabajar teniendo en cuenta la revisión bibliográfica sobre lavado de suelo con surfactantes. Las concentraciones adoptadas para este proyecto se establecieron en 1, 2, 4 y 6 veces la CMC, teniendo así los siguientes valores: 250 ppm, 500 ppm, 1000 ppm y 1500 ppm.

Ilustración 17. Grafica tensión superficial para identificar la CMC. TRINTO X-100



Fuente: Resultados CMC, laboratorios ICP

Partiendo de los resultados obtenidos en la CMC, con los que se concluyó que para 10 ppm de surfactante al 26% se requieren 0.26 ml de surfactante, se establecieron las cantidades necesarias para preparar cada una de las concentraciones; bajo este orden de ideas, las concentraciones 250 ppm, 500 ppm, 1000 ppm y 1500ppm se prepararon mezclando 6.5 ml, 13 ml, 26 ml y 39 ml de surfactante Tritón X-100 al 26% respectivamente, con 1000 ml de agua. Las concentraciones mencionadas anteriormente, fueron preparadas con Triton X-100 al 26% debido a que a esta concentración se determinó la CMC del surfactante.

Paralelo a esto, se trabajó una muestra de suelo como referencia o control, en la cual el lavado del suelo se realizó por medio de la circulación de agua sin mezcla de surfactante.

La preparación del Tritón X-100 al 26 % se llevó a cabo adicionando 24,505 mL de surfactantes al 100% en 100mL de agua.

Para obtener más información acerca de la determinación de la CMC, remitirse al ANEXO C.

5.5 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA EXTRAÍDA EN CAMPO PALAGUA.

Con el fin de conocer las características del suelo al cual se le aplicó la técnica de remediación, se realizaron pruebas fisicoquímicas a la muestra extraída en Campo Palagua, determinando así 12 propiedades de la misma incluyendo análisis de TPH.

Las propiedades fisicoquímicos de la muestra se determinaron en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana y del Instituto Colombiano de Petróleos; estos análisis se realizaron por triplicado con el fin de obtener un margen de error mínimo.

Previo a realizar los análisis de laboratorio, se retiraron de la muestra todos los materiales extraños tales como: piedras, restos de vegetación, vidrios, entre otros; luego, el suelo fue pasado por un tamiz con maya de 2 mm hasta tener un volumen homogenizado de la muestra. (Ver Ilustración 18)

Ilustración 18. Tamizado del suelo contaminada.



Fuente: Autor.

Las características físico-químicas del suelo fueron determinadas siguiendo los procedimientos expuestos en el literal 4.2.3 de la metodología antes mencionada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los análisis físico-químicos del suelo trabajado.

5.5.1 Textura.

Tabla 11. Lecturas de hidrómetro y temperatura - Textura Suelo Contaminado.

Muestra	SUELO CONTAMINADO							
	Lectura a los 40 segundo.				lectura a las 2 horas.			
	Hidrometro	Termometro (°C)	C	Hidrometro corregida	Hidrometro	Termometro (°C)	C	Hidrometro corregida
C1	0,5	22	0,92	1,42	0,1	22	0,92	1,02
C2	0,5	22	0,92	1,42	0,2	22	0,92	1,12
C3	0,4	22,5	1,1	1,5	0	23	1,28	1,28

Fuente: Autor

Tabla 12. Lecturas de hidrómetro y temperatura - Textura Suelo contaminado.

	CONTENIDO DE LOS SEPARADOS			SUELO CONTAMINADO
	% ARENA	% ARCILLA	% LIMO	CLASE DE TEXTURA
C1	97,16	2,04	0,8	Suelo Arenoso
C2	97,16	2,24	0,6	Suelo Arenoso
C3	97	2,56	0,44	Suelo Arenoso

Fuente: Autor.

Al ubicar en el cuadro textural los resultados obtenidos en los porcentajes de contenido de separados, expuestos en la Tabla 15, se logró determinar que la muestra de suelo contaminada presenta una textura de tipo arenoso lo cual es coherente con los resultado que se obtuvieron en la prueba de permeabilidad e infiltración, ya que se encontró un comportamiento característico de suelos arenosos.

5.5.2 Densidad.

Tabla 13. Resultados de Densidad Aparente en suelo contaminado.

SUELO CONTAMINADO (IN SITU)			
Densidad Aparente		Densidad Aparente	
C 1		C 2	
Peso del cilindro (gr)	138,9	Peso del cilindro (gr)	124
Peso del Cilindro + Muestra humeda (gr)	732,8	Peso del Cilindro + Muestra humeda (gr)	688,8
Peso del Cilindro + Muestra Seca (gr)	649,4	Peso del Cilindro + Muestra Seca (gr)	603
Peso Muestra Seca (gr)	510,5	Peso Muestra Seca (gr)	479
Diametro del cilindro (cm)	5	Diametro del cilindro (cm)	5
Longitud del Cilindro (cm)	16	Longitud del Cilindro (cm)	14,7
Volumen del Cilindro (cc)	314,16	Volumen del Cilindro (cc)	288,63
Densidad Aparente (g/cc)	1,62	Densidad Aparente (g/cc)	1,66
PROMEDIO		1,64	

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta que el rango de variación para la Da. en suelos arenosos con condiciones normales va de 1.5 a 1.7 gr/cm³, se puede concluir que los resultados arrojados para la muestra de suelo contaminado, presentados en la Tabla 16, muestran una afectación leve en la densidad aparente del suelo de Campo

Palagua; y que la presencia del contaminante no influye significativamente en un aumento de esta propiedad.

Tabla 14. Resultados de Densidad Real.

SUELO CONTAMINADO			
MEDIDAS REALIZADAS	M1	M2	M3
Peso de la Probeta (gr)	52,8	53,5	53,9
Peso de la probeta + muestra de suelo (gr)	72,8	73,5	73,9
Peso muestra de suelo (gr)	20	20	20
Volumen liquido desplazado (ml)	12	11,5	11,5
Densidad Real de cada muestra	1,67	1,74	1,74
Densidad Promedio	1,71		

Fuente: Autor.

Por otro lado, la densidad real del suelo ubicada en 1.71 gr/cm^3 indica un valor bajo a comparación con el rango estándar expuestos por Rafael Llorca; 2006, los cuales oscilan entre $2,60$ y $2,75 \text{ g/cm}^3$ para suelos minerales. Si bien, el valor encontrado no se encuentra dentro del rango referenciado, no se indica que posea condiciones desfavorables. Este valor presentado en la Tabla 17 simplemente da una apreciación de bajo contenido de mineral y abundante materia orgánica en la muestra.

Finamente, la variación de los resultados presentados, tanto para Densidad Aparente como para Densidad Real, pudo haberse ocasionado a causa del tamizado y pre tratamiento que se le realizó a la muestra antes de efectuarse los análisis.

5.5.3. Humedad.

Tabla 15. Resultados Humedad Gravimétrica suelo contaminado.

SUELO CONTAMINADO	
Humedad Gravimetrica	
M1	
Peso del Plato	107,2
Peso del Plato + Muestra Humeda	207,2
Peso de la Muestra Humeda	100
Peso del Plato + Muestra Seca	195,4
Peso de la Muestra Seca	88,2
% Humedad Gravimetrica	13,38
Humedad Gravimetrica	
M2	
Peso del Plato	102,4
Peso del Plato + Muestra Humeda	202,4
Peso de la Muestra Humeda	100
Peso del Plato + Muestra Seca	190,8
Peso de la Muestra Seca	88,4
% Humedad Gravimetrica	13,12
Humedad Gravimetrica	
M3	
Peso del Plato	119,4
Peso del Plato + Muestra Humeda	219,4
Peso de la Muestra Humeda	100
Peso del Plato + Muestra Seca	207,2
Peso de la Muestra Seca	87,8
% Humedad Gravimetrica	13,90
PROMEDIO	13,47

Fuente: Autor

Tabla 16. Resultados Porcentaje Humedad Volumétrica del Suelo Contaminado.

SUELO CONTAMINADO				
MUESTRA	%HG	Da	% HV	PROMEDIO
M1	13	1,5	19,5	20,47
M2	13	1,5	19,5	
M3	14	1,6	22,4	

Fuente: Autor

Aunque los valores obtenidos en la determinación de la humedad, indican altos niveles en la relación agua contenida en los poros de la muestra, no se puede llegar a concluir que el alto contenido de ésta, se deba a la presencia de hidrocarburos; debido a que los porcentajes de humedad son valores dinámicos que varían dependiendo de las características y condiciones físicas del perfil que a su vez, pueden cambiar ampliamente en función del tiempo.

5.5.4 Porosidad.

Tabla 17. Resultados de Porosidad Total del Suelo Contaminado.

POROSIDAD (Pt)				
SUELO CONTAMINADO				
Muestra	D. Aparente	D. Real.	%Pt	PROMEDIO
M1	1,66	1,67	0,6	3,75
M3	1,62	1,74	6,9	

Fuente: Autor.

Los valores de porosidad presentados en la Tabla 20, determinados a partir de la densidad real y densidad aparente, demuestra incongruencia con los resultados arrojados en las pruebas de texturas, permeabilidad e infiltración, ya que se presenta un valor demasiado pequeño que el registrado por la literatura (< 30 % corresponde a suelos compactos); influenciado posiblemente por el pre tratamiento de la muestra antes de realizar los análisis.

El resultado encontrado en la porosidad total de la muestra, pudo ser ocasionado por diferencias en la determinación de la Da y Dr, puesto que al tenerse volúmenes de muestra diferentes, pueden darse una variación de los valores determinados. Otro factor relevante puede llegar a ser la localización de la muestra dentro del terreno, con lo cual se estaría ubicando la muestra en diferentes perfiles.

5.5.5 Permeabilidad e infiltración.

Tabla 18. Resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad e infiltración.

PERMEABILIDAD E INFILTRACION					
Ensayo	V. H ₂ O (ml), 1 Pulgada (2,54cm)	T (min)	Velocidad de Infiltracion (cm/hor)	Permeabilidad	Clase de infiltración
1	444	01:30	101,6	Muy Rapida	AF, A
2	444	05:16	29,20	Muy Rapida	AF, A

Partiendo de los valores obtenidos en el análisis de permeabilidad e infiltración, expuesto en la Tabla 21, se puede concluir que el suelo de Campo Palagua posee una permeabilidad catalogada en muy rápida y una infiltración AF, A.

Como se había mencionado antes, los resultados obtenidos para esta práctica son congruentes con la textura determina al inicio de la caracterización fisicoquímica, ya que los resultados obtenidos de permeabilidad e infiltración son el comportamiento característico de un suelo arenoso.

Para este análisis es conveniente aclarar que, la determinación de la propiedad se realizó una sola vez, debido a que se presentaron precipitaciones durante la noche previa a la medición.

5.5.6 Temperatura. Los valores de temperatura registrados en campo, los cuales fueron tomados a dos profundidades, con ayuda de un termómetro de mercurio, se exponen a continuación en la Tabla 22.

Tabla 19. Resultados en la medición de temperatura del suelo.

TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL SUELO		TEMP. AMBIENTE	TEMPERATURA DEL SUELO A 60 CM DE	
°C	Promedio	°C	°C	Promedio
31	30,64	35	30	29,67
32				
31,5				
31			29	
30				
29			30	
30				

Fuente: Autor

5.5.7 pH.

Tabla 20. Resultados determinación de pH - Suelo Contaminado.

SUELO CONTAMINADO			
C1			
Valor pH en H ₂ O	Valor pH en KCL 1N	Δ pH	
5,78	6,32	0,54	
C2			
Valor pH en H ₂ O	Valor pH en KCL 1N	Δ pH	Promedio
6,97	6,4	-0,57	-0,16
C3			
Valor pH en H ₂ O	Valor pH en KCL 1N	Δ pH	
6,84	6,4	-0,44	

Fuente: Autor.

Partiendo de los valores de pH determinados en las soluciones de H₂O y KCL 1N, los cuales se ubicaron en un rango de pH ligeramente ácido, se calculó el Δ pH de la muestra obteniendo un valor negativo, lo cual indica que el suelo procedente de Campo Palagua actúa como un intercambiador de cationes, y en él predominan la carga negativa.

5.5.8 Materia Orgánica.

Tabla 21. Datos obtenidos en la determinación de %MO. Suelo Contaminado

DATOS					
MUESTRA	V Dicromato	N Dicromato	V sln Ferrosa gastada en la muestra	N sln Ferrosa	V sln Ferrosa gastada en el Blanco
M1	5	1	5,05	0,99	11
M2	5	1	4,65	1,08	11
M3	5	1	5	1,00	11

Fuente: Autor.

Tabla 22. Resultados %C y %MO en el suelo contaminado.

CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA		
SUELO CONTAMINADO		
Muestra	%C	% MO
M1	7,66	13,20
M2	8,88	15,30
M3	7,80	13,45

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que la presencia de hidrocarburos puede alterar el valor de Materia Orgánica aumentándolos durante la determinación, se decidió trabajar el análisis solo con el valor de porcentaje de Carbono Orgánico obtenido.

Al hacer una comparación con resultados expuesto en la Tabla 25 y los publicados por (FERNÁNDEZ, C, 2008), quien reportó valores de carbono orgánico en suelos de textura franco arenosa contaminados con hidrocarburos de 5,45%, y lo expuesto por (BARRIOS; POLYCHRONIADIS, 2008) quienes reportan valores de carbono orgánico de 6,120%, se puede observar un impacto mayor del hidrocarburo en la muestra analizada en este proyecto, lo cual pudo ocasionarse por las altas concentraciones de contaminación encontradas en la muestra.

El %CO determinado presenta un valor muy elevado debido a las altas concentraciones de HC presentes en el área de estudio ya que, aunque se registran valores para suelos franco arenosos cercanos al determinado en esta práctica; al hacer una comparación con lo publicado por la Universidad Estatal de Kansas, en un artículo sobre el carbono orgánico y el ciclo global del carbono, donde exponen que, los suelos varían en la cantidad de carbono orgánico, oscilando de menos de 1 % en suelos arenosos a más de 20% en los suelos de pantanos o ciénagas, teniendo así una incongruencia, si se tiene presente la textura arenosa determinada en la muestra de Campo Palagua.

5.5.9 Contenido de Nutrientes. Los resultados y análisis de contenido de Nutrientes para las muestras de suelo, no se presentaron en los resultados del proyecto, debido a inconvenientes en la determinación de esta propiedad.

5.5.10 Determinación de la porosidad efectiva y del volumen de poro intercambiado.

Tabla 23. Resultados Obtenidos de porosidad efectiva y volumen de poro intercambiado.

Caudal (ml/seg)	t 0,5 (min)	Volumen de la columna (cm ³)	Área del círculo (cm ²)	ne (ml/cm ³)	Vf (ml/d.cm ²)	V (cm/d)
2	200	3141,5	78,53	0,13	36,7	282,3

Fuente: Autor.

Con los valores expuestos en la Tabla 26, correspondientes a Caudal, t_{0,5}, Volumen de las columnas y área del círculo, fue posible calcular los valores de porosidad efectiva y velocidad de filtro los cuales se ubicaron en 0.13 ml/cm³ y

36.7 ml/d.cm² respectivamente. Con estos datos y realizando las conversiones correspondientes se determinó la velocidad efectiva en el sistema, llegando a concluir, que una gota de agua tarda 3.4 horas en atravesar la columna de suelo, es decir, el tiempo total necesario para efectuar un lavado total.

Teniendo presente el valor de 3.4 horas, el cual indica el tiempo total en el que se realiza un lavado de suelo, se puede concluir que para un día transcurrido se efectuaron 7 lavados de suelo ó volúmenes de poro intercambiado.

5.5.11 Determinación de TPH en el suelo lavado a través del método gravimétrico de Grasas y Aceites (G&A). Los resultados arrojados por el método gravimétrico de Grasas y Aceites para identificar la presencia de TPHs en el suelo contaminado, antes y después del lavado, no fueron expuestos en los resultados y análisis del proyecto al no ser confiables, ya que no presentaron congruencia con los resultados obtenidos en el análisis de G&A para el agua de lavado, expuestos en el literal 5.12

5.6 ANÁLISIS DEL AGUA ANTES Y DURANTE EL LAVADO DE SUELO.

Las concentraciones de G&A en el agua de lavado procedente de cada columna, se determinaron a partir de muestras de agua recogidas cada 15 días en frascos schott. Estas fueron almacenadas y conservadas con ácido sulfúrico, y posteriormente, llevadas al laboratorio para analizar. (Ver ilustración 19)

Ilustración 19. Muestra almacenada para análisis de G&A



Fuente: autor.

A continuación, en la Tabla 27 se muestran las fechas de recolección durante los cuatro meses de lavado.

Tabla 24. Fechas de recolección - Muestras agua de lavado

FECHA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.	OBSERVACIONES
04 de Agosto	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios de la UPB.
20 de Agosto	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios de la UPB.
5 de Septiembre	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios del ICP
20 de Septiembre	No se entregaron muestras al ICP, por falta de material óptimo para envasarlas.
5 de octubre	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios del ICP

20 de octubre	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios del ICP
4 de Noviembre	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios del ICP
18 de Noviembre	5 muestras de agua de lavado entregadas a los laboratorios del ICP

Fuente: Autor.

Los volúmenes de agua de lavado, producidos en cada columna, fueron registrados diariamente con el fin de tener un control del caudal manejado. De igual forma, estos volúmenes ayudaron a detectar el taponamiento de las columnas y otras fallas dentro de ellas. (Ver Ilustración 20)

Para obtener más información sobre el registro diario de pH, volumen producido de agua de lavado y observación del comportamiento de la columna ver Anexo D.

Ilustración 20. Recolección de agua de lavado en cada columna.



Fuente: Autor

EL agua utilizada dentro del lavado de suelo, fue captada de una quebrada veredal del municipio de Piedecuesta, Santander, que se encuentra ubicada colindando con las instalaciones de la UPB, con el fin de simular las mismas condiciones que se tendrían al trabajar la técnica en campo, es decir, en el predio contaminado sobre el cual se realiza este proyecto.

5.7 CONDICIONES DE DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “LAVADO DE SUELO”.

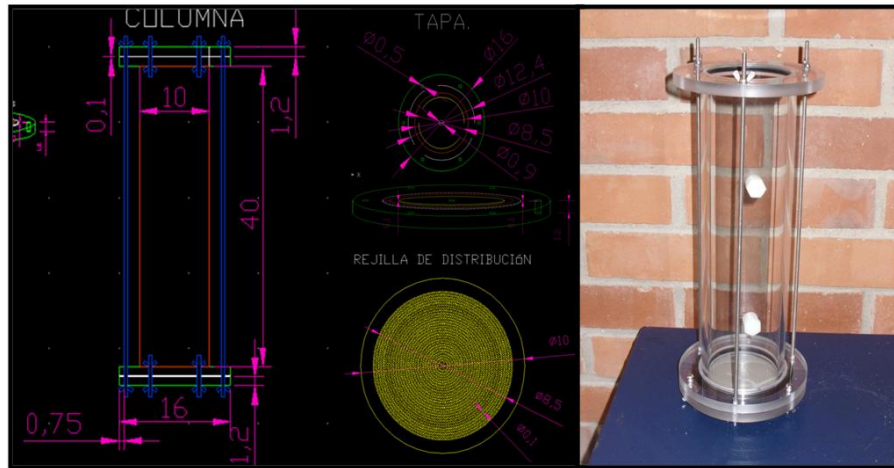
5.7.1 Diseño de las columnas utilizadas en el lavado de suelo. El diseño de las columnas utilizadas en la aplicación de la técnica Lavado de Suelo fue sustentado bajo normas internacionales con las que se presenten estandarizar este tipo de investigaciones. ... Véase el numeral 2.9.1...

Inicialmente se realizó un diseño en AUTOCAD (Ver ilustración 21) teniendo en cuenta las recomendaciones de los ingenieros del ICP, con los cuales se acordó trabajar una altura para las columnas de 40 cm; con el fin de simular un tratamiento a una profundidad de la misma medida; igualmente, teniendo en cuenta que la muestra de suelo extraída se ubicaba entre 0 y 90 cm de profundidad; distancia vertical a la cual se presenta la contaminación en la zona de extracción de la muestra.

Teniendo los diseños, se estableció el material de las columnas basándose en revisión bibliográfica y textos investigativos, concluyendo finalmente el acrílico fundido como material óptimo de las columnas.

Las 4 columnas a utilizar fueron compradas a la empresa Soil Measurement Systems, LCC

Ilustración 21. Diseño preliminar de la Columna - Columna Adquirida.



Fuente: Autor

5.7.2 Material usado en la aplicación de la técnica de remediación. Para ejecutar la técnica de remediación no sólo se utilizaron las columnas antes mencionadas; también fue necesario el uso de una bomba peristáltica acompañada de elementos complementarios o conexiones, con los cuales se transportó el agua de lavado a las columnas. (Ver Ilustración 22)

Los materiales complementarios de la bomba peristáltica utilizados fueron:

- 1 Cabezal para bomba REF: MF 07519-25
- 5 cartuchos para cabezal de bombas REF: 07519-85
- 1 Motor standar precisión L/S REF: MF 77521-40
- 1 Manguera pharmed, 2.79 MM ID, 100 Ft, REF: 95809-48
- Conexiones y acoples para verificar el caudal de entrada a la columna y manejar un flujo constante.

Ilustración 22. Montaje de las Columnas - Bomba Peristáltica.



Fuente: Autor.

5.8 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Basados en la literatura, el diseño de las columnas y teniendo en cuenta el aporte de los ingenieros del ICP, quienes recomendaron trabajar con un caudal no mayor a 2.5 mL/min, se estableció que el caudal a trabajar en el lavado de suelo sería 0.5 mL/min. Otro soporte por el cual se tomó este caudal se basa en que, para la aplicabilidad en campo de esta técnica de remediación, se deben tomar caudales pequeños al momento de inyectar el surfactante en el suelo.

El Tiempo de retención Hidráulico, es un factor importante a la hora de definir el caudal del sistema, ya que con este se logra estimar el tiempo de contacto que habrá entre la mezcla agua-surfactante y el suelo a remediar.

5.9 MONTAJE DE LAS COLUMNAS PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA “LAVADO DE SUELO”.

Luego de tener el material necesario para aplicar el método de remediación (Columnas, bomba peristáltica, Concentración de surfactantes, etc.), se realizó el

llenado de las 5 columnas correspondientes a 4 concentraciones de surfactante y un blanco como referencia.

El llenado de las columnas se efectuó de manera que el suelo dentro de ellas fuera homogéneo y teniendo especial cuidado que no quedaran demasiado compactadas. (Ver Ilustración 23)

Ilustración 23. Llenado de Columnas con suelo contaminado.



Fuente: Autor.

5.10 TRATAMIENTO PARA EL AGUA DE LAVADO.

El agua resultante de cada columna, a la cual se le hizo un registro del pH diariamente, fue recogida posteriormente en un recipiente con el fin de aplicarle un pre-tratamiento para remover un poco la contaminación extraída del suelo contaminado. (Ver Ilustración 24)

El filtro utilizado fue construido con 4 capas (Arena – grava – carbón activado – grava) por las cuales se pasaba el agua de lavado en forma descendente con ayuda de un equipo de venoclisis; finalmente el agua que salía del filtro se

disponía en la planta de tratamiento de la Universidad Pontificia Bolivariana, para lograr una remoción más completa.

Ilustración 24. Tratamiento para el agua de lavado. -Filtro de Carbón Activado.



Fuente: Autor.

5.11 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MONITOREO FISICO-QUIMICO DEL AGUA UTILIZADA EN EL LAVADO DE SUELO.

5.11.1 Análisis de la variación del ph al agua de lavado. Previo a iniciar el lavado de suelo y antes de realizar la mezcla de agua- surfactante, se determinaron los parámetros pH y temperatura al agua que se utilizaría en la mezcla, con el fin de conocer sus características.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 28.

Tabla 25. pH y Temperatura del Agua sin mezcla de surfactante.

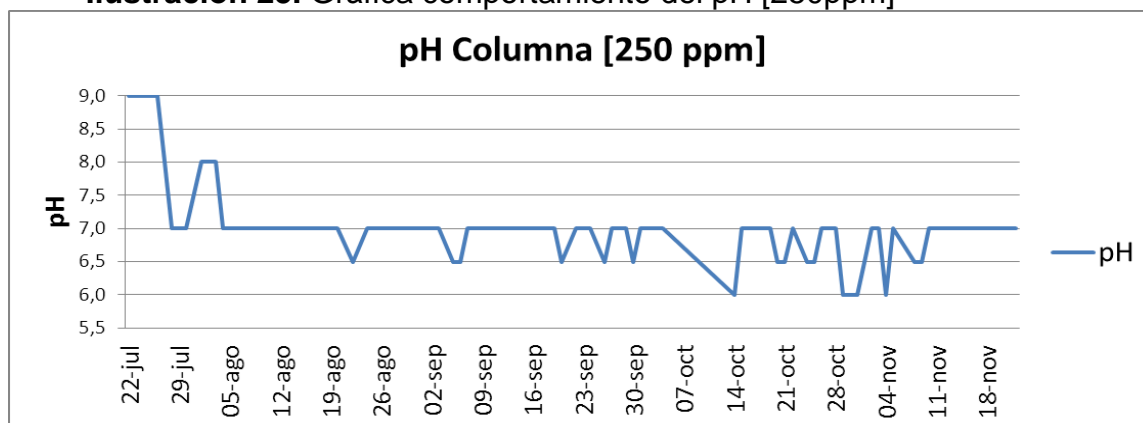
Características del agua para mezcla	
pH	6
Temperatura	22.2 °C

Fuente: Autor

Puesto en marcha el lavado de suelo, se realizaron mediciones diarias de pH al agua de lavado saliente de las columnas con el fin de conocer el comportamiento durante los cuatro meses de tratamiento e identificar variaciones extremas de este parámetro en el agua.

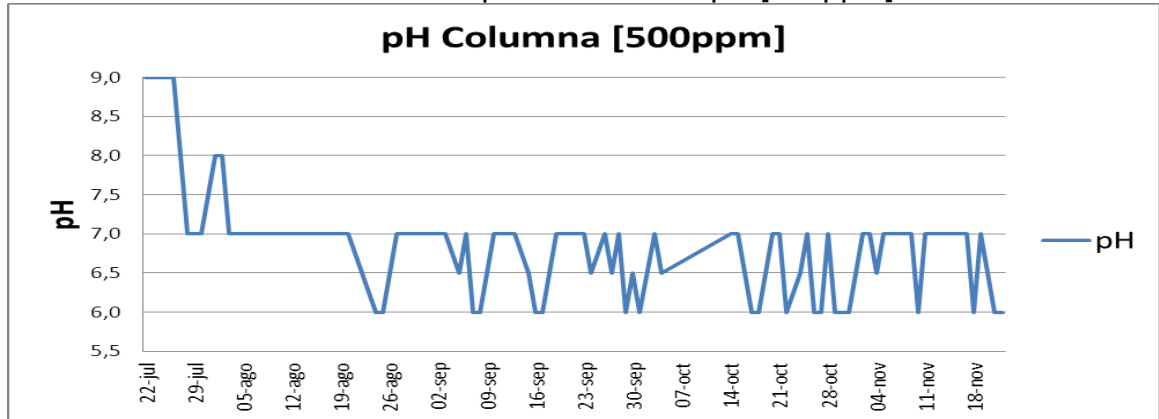
A continuación en las ilustraciones 25 a 29 se muestran los resultados arrojados en el monitoreo del pH en cada una de las columnas.

Ilustración 25. Gráfica comportamiento del pH [250ppm]



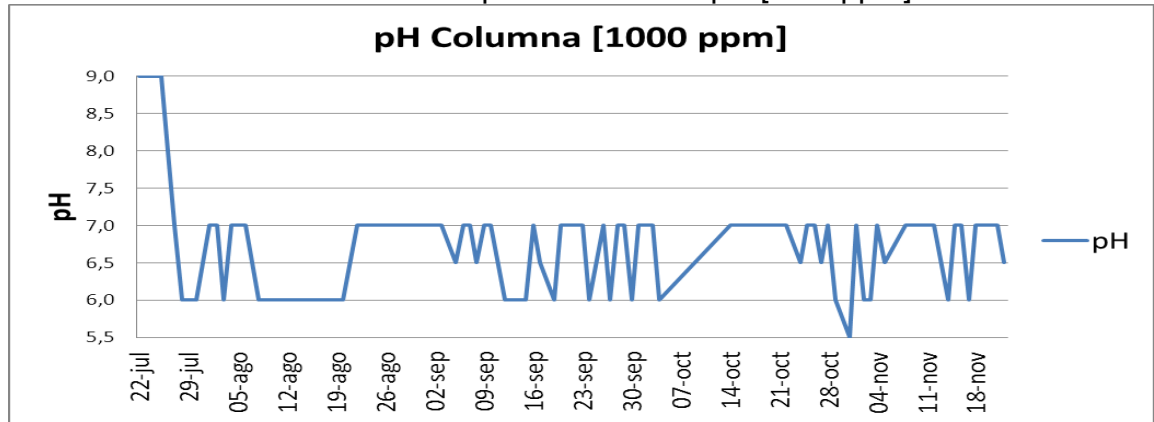
Fuente: Autor

Ilustración 26. Gráfica comportamiento del pH [500ppm]



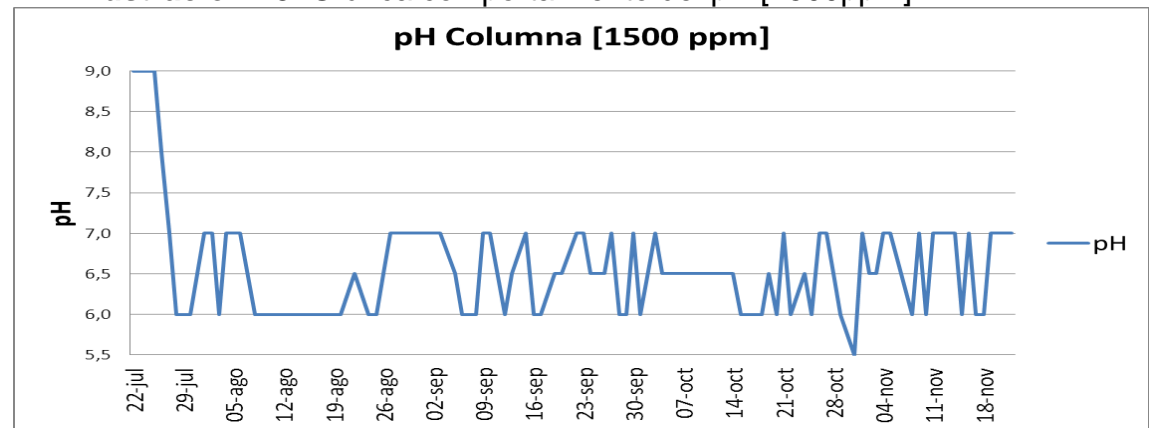
Fuente: Autor

Ilustración 27. Gráfica comportamiento del pH [1000ppm]



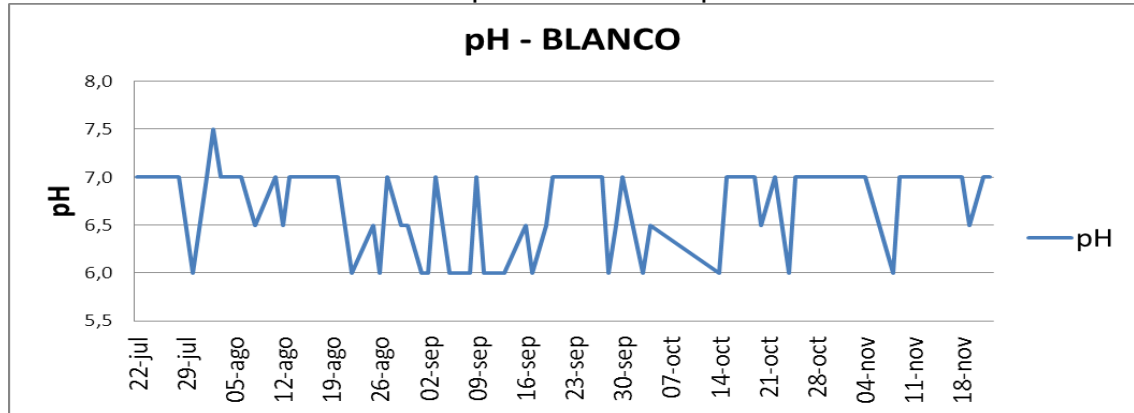
Fuente: Autor

Ilustración 28. Gráfica comportamiento del pH [1500ppm]



Fuente: Autor

Ilustración 29. Gráfica comportamiento del pH BLANCO



Fuente: Autor

El registro de pH tomado durante el tiempo de lavado, demuestra un incremento en los primeros 4 días que puede ser atribuible al surfactante TRITON X-100. Esto pudo ocasionarse debido al rango de pH que posee el tensoactivo, que va de 6 a 8 en soluciones acuosas al 5%; lo cual elevó este parámetro en la mezcla agua-surfactante-hidrocarburo.

Otra razón importante en la que se fundamenta éste análisis, radica en que las segundas lecturas de pH, se tomaron luego de 24 horas, tiempo suficiente para que se genere un intercambio entre el surfactante y el medio contaminado; teniendo en cuenta que un ciclo de lavado, para este proyecto, se desarrolla en 3,4 horas.

Pasados los primeros días se reporta un descenso de este parámetro, ubicándose en un rango de 6 a 7, en el cual se mantuvo durante todo el lavado.

Por otro lado, los valores de pH registrados en el agua de lavado de la columna control, se ubicaron en un rango neutro entre 6 y 7, presentando oscilaciones dentro del mismo para el tiempo total de lavado.

Un valor agregado que se adquiere al mantener los valores de pH estables y aún más, tener valores neutros, es la posibilidad de utilizar procesos de

biorremediación para eliminar el surfactante e hidrocarburo que ha quedado luego del lavado. Todo esto, ya que la actividad y crecimiento microbiano son afectados fuertemente por el pH; siendo 6.5 a 8.5 un rango óptimo para el crecimiento bacteriano.

5.12 DETERMINACION DE TPH EN EL AGUA A TRAVES DEL METODO GRAVIMETRICO GRASAS Y ACEITES.

Un parámetro fundamental para determinar la remoción de hidrocarburos en el lavado de suelo y poder concluir cual fue la concentración que más contribuyó a remover la contaminación, es el análisis de grasas y aceites realizados al agua de lavado proveniente de las columnas.

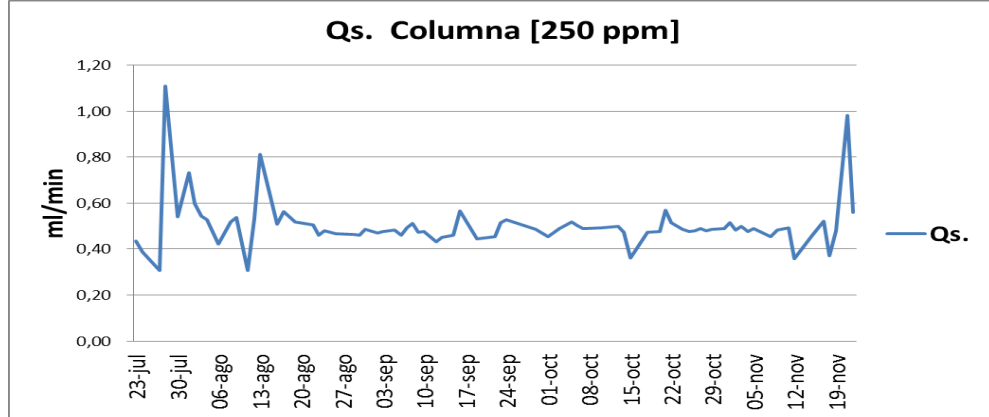
Los análisis químicos del efluente producido se efectuaron con un intervalo de tiempo de 15 días, teniendo al final 7 resultados para concentraciones de grasas y aceites en agua en cada sistema de tratamiento, que dan una noción de las remociones producidas en cada columna de suelo trabajado.

Un factor importante que ayuda en el análisis y comprensión de los resultados obtenidos en las pruebas de grasas y aceites, es el caudal manejado en cada una de las columnas; si bien, al inicio del lavado se programó la bomba peristáltica para inyectar un caudal constante de 0.5 ml/min, durante el tiempo de lavado se presentaron variaciones del caudal y problemas de taponamiento dentro de las columnas.

Los caudales diarios que se determinaron para cada columna, se calcularon teniendo en cuenta el volumen producido diariamente, y el tiempo transcurrido entre cada monitoreo de volumen.

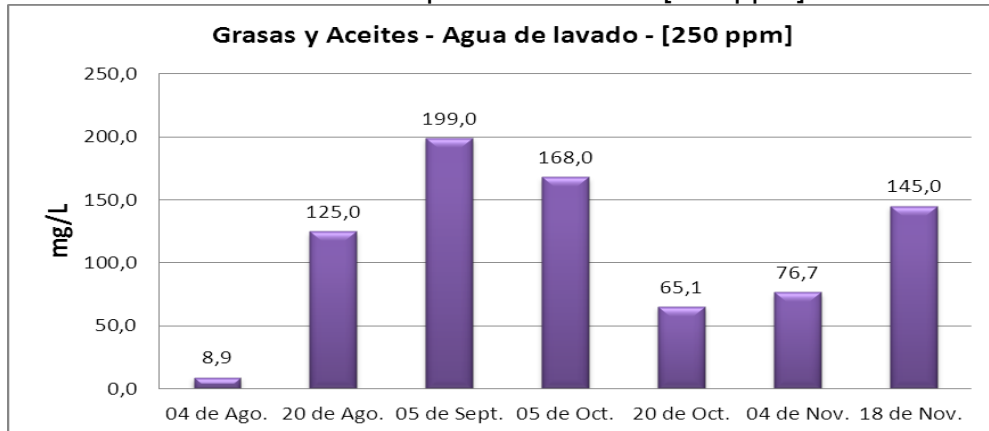
A continuación se muestran las gráficas obtenidas a partir de los análisis de grasas y aceites, y los resultados del caudal calculado.

Ilustración 30. Caudal registrado para la columna [250 ppm]



Fuente: Autor

Ilustración 31. Resultados de G&A para la columna [250 ppm]



Fuente: Autor

El comportamiento del caudal para la columna con concentración de surfactante más baja, expuesto en la Ilustración 30 demuestra de manera general una tendencia constante de caudal que oscila entre 4.5 y 5.5 ml/min. De igual forma presenta algunos puntos extremos como son, los dos descensos en las fechas 11 de agosto y 15 de octubre, y los dos aumentos, hasta 1 ml/min; en las fechas 28 de julio y 21 de noviembre.

En los resultados de G&A obtenidos de la columna con concentración de surfactante de 250 ppm, se puede observar un bajo nivel de remoción al inicio del tratamiento, a tal punto que se considera un inicio de remociones luego de la

primera fecha de monitoreo. También se aprecia un incremento de remociones a la fecha 05 de septiembre, en la que se presenta el nivel más alto de G&A detectado. Luego de esto se presenta un descenso que va hasta el 20 de Octubre, y nuevamente se alzan las remociones sin superarse el valor de la fecha 5 de septiembre.

Al calcularse un promedio de remociones, con los valores obtenidos durante los cuatro meses, se aprecia un valor de 129 mg/L. de G&A extraídos con una concentración 250 ppm.

La fluctuación de los valores de G&A durante el periodo de lavado se soporta a partir del comportamiento del caudal durante este mismo tiempo; bajo este orden de ideas, se indica que, aunque la gráfica en la ilustración 31 señala un incremento de caudal a finales de Julio, posterior a esto se genera un descenso del mismo, acompañado de fluctuaciones, lo cual provoca un nivel bajo de remociones en la primera fecha de medición.

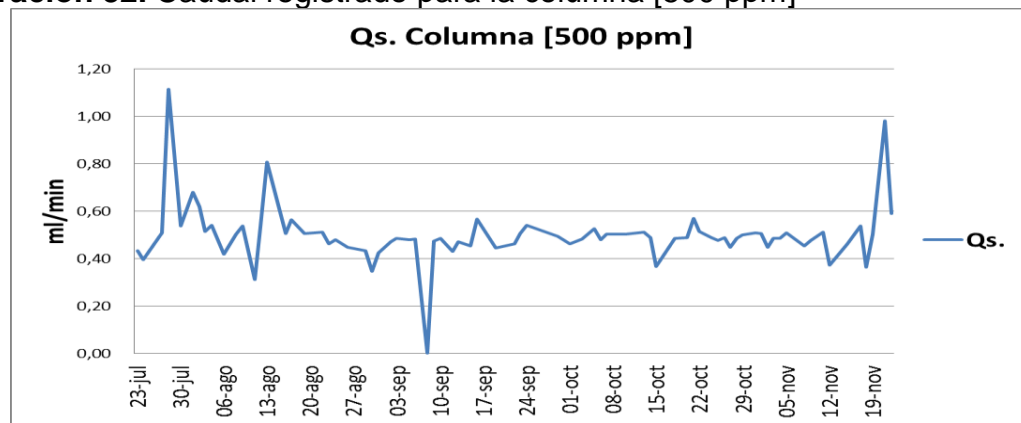
Pasada ésta primera medición, se presenta un taponamiento de la columna y por tal motivo se destapa la misma, con el fin de eliminar la obstrucción que impide un caudal continuo. A causa de esto se genera un aumento del caudal como se puede observar en la gráfica el día 11 de Agosto generando a su vez un incremento en la remoción obtenida en la segunda medición.

Al igual que la segunda, en la tercera medición realizada el día 5 de Septiembre, se presenta un incremento en los resultados, debido al destape de la columna el día 1 de sept.

En las mediciones correspondientes a los días 5 y 20 de Octubre, se observa un descenso leve en el caudal los días anteriores a la medición ocasionando un declive en la remoción de la primera fecha, y un descenso brusco en la fecha 15 de Octubre que genera a su vez una reducción considerable en la remoción de la quinta fecha de monitoreo.

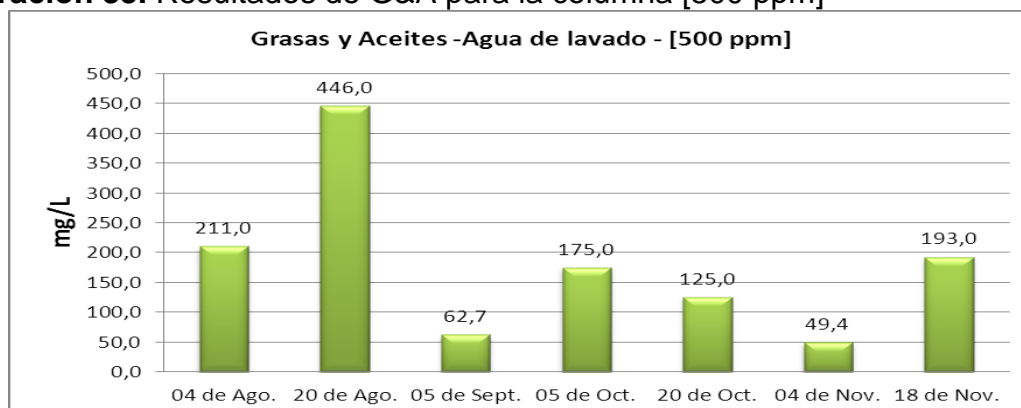
Finalmente para las fechas 4 y 18 de noviembre, se presentan aumentos en las remociones, teniendo en cuenta que para la primera fue muy leve el aumento ya que se tuvo un caudal relativamente constante; y para la segunda se presentó un incremento que coincide con las variaciones del caudal en esos días.

Ilustración 32. Caudal registrado para la columna [500 ppm]



Fuente: Auto

Ilustración 33. Resultados de G&A para la columna [500 ppm]



Fuente: Autor

Observando la gráfica en la Ilustración 32, en la cual se presentan los valores de caudal para la columna de [500ppm], se aprecia un descenso importante que fractura el comportamiento continuo del caudal durante el tiempo de lavado. Este valor, que corresponde a la fecha 7 de septiembre, se presenta debido al taponamiento de la columna y al no funcionamiento de la misma durante 24 horas.

Por otra parte, se observa un comportamiento similar a la columna antes analizada, ya que coinciden dos fechas, con ascensos hasta 1 ml/min, al inicio y final del lavado.

Contrario a lo observado en la primera columna, en el suelo trabajado bajo una concentración 500 ppm, se observan niveles altos de remoción desde la primera fecha de monitoreo. Luego de esto se aprecian fluctuaciones en las cuales se presentan dos fechas con remociones altas. Con los datos expuesto en la Ilustración 33 se puede obtener un promedio de remoción, durante todo el tiempo lavado, de 180.3 mg/L. G&A.

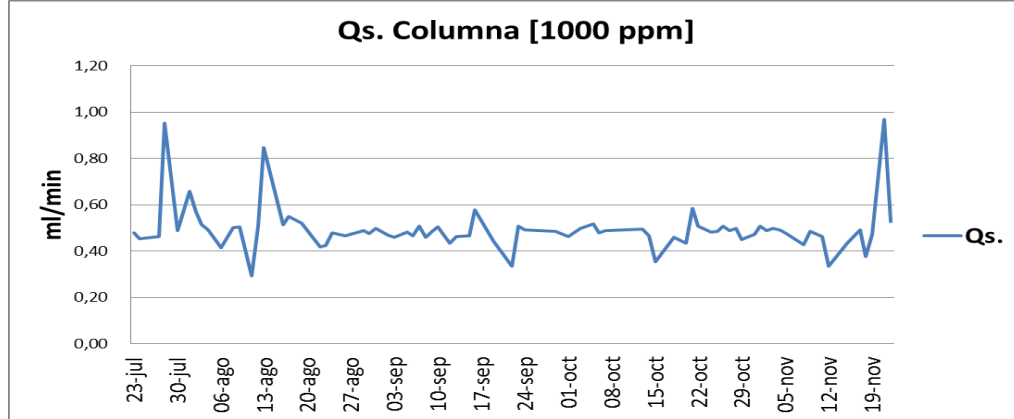
Luego de obtenerse remociones de 211 mg/L para la primera fecha de monitoreo, se presentan un taponamiento de la columna para lo cual se hizo necesario destapar la misma, a causa de esto se presenta un ascenso en el caudal haciendo que se aumenten las remociones para el día 20 de Agosto.

Luego de estas mediciones en las que se mostraron altos niveles de remoción, se presentó un descenso en el caudal, lo cual no permitió tener un flujo constante de salida. Ante esto se destapo la columna el día 7 de septiembre y se dejó un día sin bombear hasta que se encontrara el problema. Pasada las 24 horas, se reinició el sistema nuevamente la inyección de caudal lo cual provocó un ascenso en los resultados de remoción de la fecha 5 de Octubre.

Para las siguientes fechas de monitoreo, 20 de Octubre y 4 de Noviembre, se presentó un descenso en las remociones que van desde 125 mg/L a 49.4 mg/L respectivamente; para este caso se presentan descensos y fluctuaciones en el caudal los cuales se puede apreciar en la Ilustración 32 a partir de la fecha 22 de Octubre.

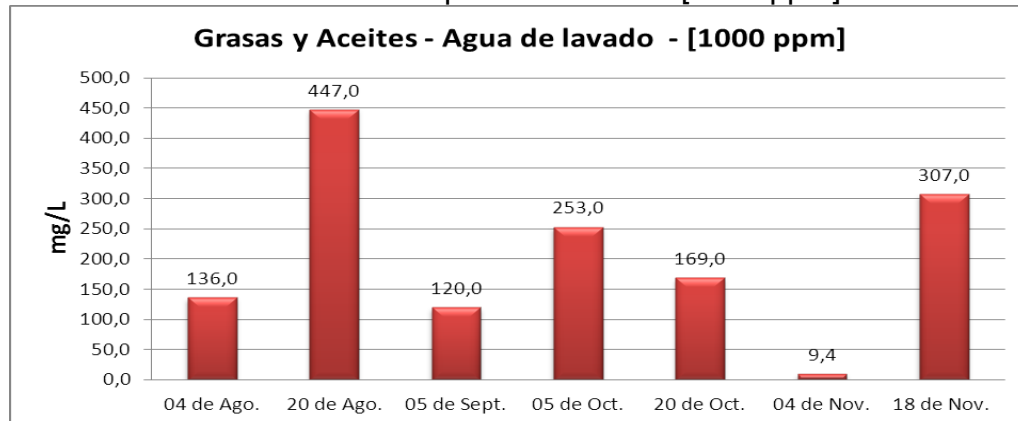
Finalmente en la última fecha de monitoreo se presenta un incremento en los resultados de G&A, siendo este el valor más alto luego de las dos primeras fechas de monitoreo.

Ilustración 34. Caudal registrado para la columna [1000 ppm]



Fuente: Autor

Ilustración 35. Resultados de G&A para la columna [1000 ppm]



Fuente: Autor

En la columna de concentración 1000 ppm, se observa un comportamiento de caudal similar, al presentado en la columna de [500ppm], ya que coinciden los descensos y aumentos para las fechas 28 de Julio, 13 de Agosto y 21 de noviembre; al igual que, un comportamiento continuo con oscilaciones entre 4.5 y 5.5 ml/min para el tiempo total de lavado.

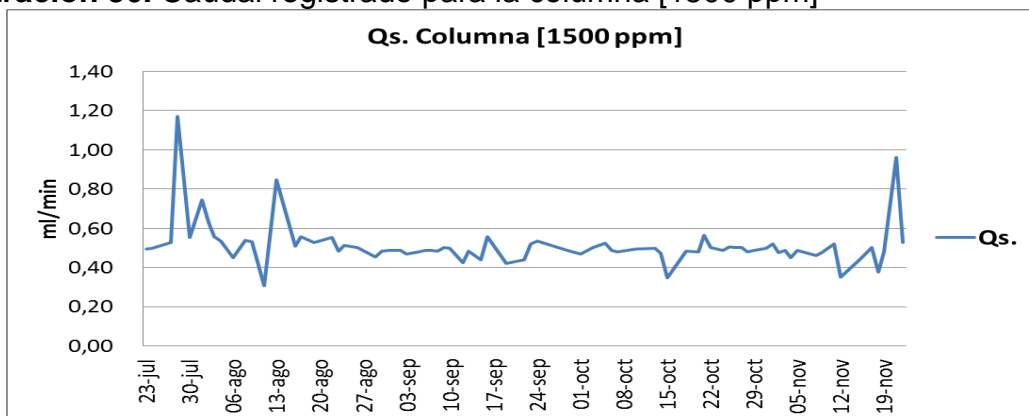
Al observar los resultados arrojados en el análisis de la columna con concentración de surfactante de 1000 ppm, se pueden apreciar niveles altos de G&A en cada fecha de monitoreo, exceptuando el análisis realizado el día 4 de Noviembre, en el cual se presenta un valor atípico con relación a las otras fechas.

Durante el periodo total de lavado, para la columna trabajada en éste análisis, se presentó un promedio de remoción de 238.6 mg/L, lo cual da a este sistema la mayor concentración de G&A extraídos del suelo a comparación de las columnas con concentraciones de [250 ppm] y [500ppm].

Al igual que las columnas anteriores, para la columna de [1000 ppm] se observa inicialmente un bajo nivel de remoción que indica un descenso del caudal; posterior al primer análisis, se efectuó un destape de la columna el día 10 de agosto, que ocasión un incremento de G&A en la segunda muestra analizada.

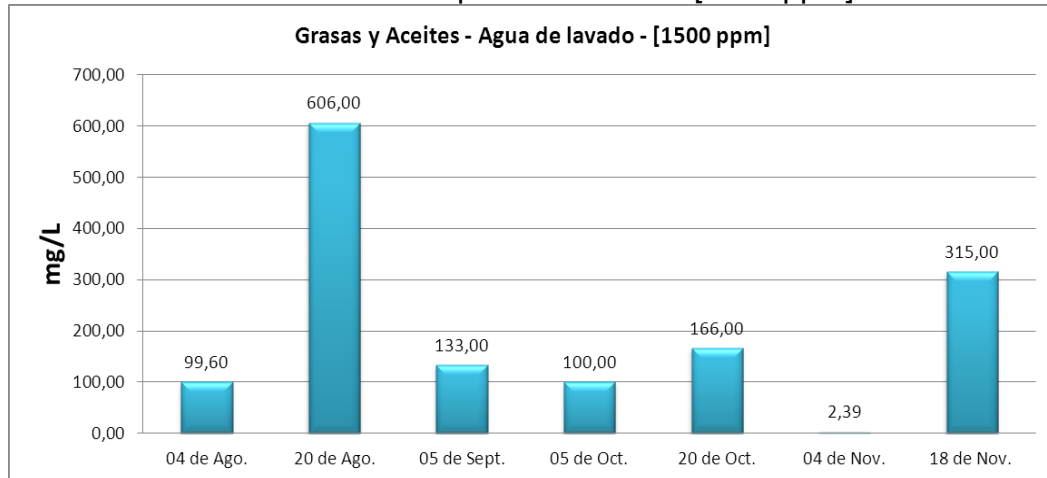
Al hacer un análisis detallado de los resultados obtenidos en las columnas de [500 ppm] y [1000 ppm], se aprecia un comportamiento similar en los resultados de las muestras tomadas en las 5 últimas fechas (5 de sept. - 5 de Oct. - 20 de oct. - 4 de Noviembre. - 18 de Noviembre), sin embargo se aprecian valores mayores para la columna de [1000ppm], lo cual da una noción de mayores remociones de hidrocarburos con la mezcla agua-surfactante preparada para [1000ppm].

Ilustración 36. Caudal registrado para la columna [1500 ppm]



Fuente: Autor

Ilustración 37. Resultados de G&A para la columna [1500 ppm]



Fuente: Autor

Los valores presentados en la Ilustración 36, demuestran un valor de caudal más constante que el observado en las columnas anteriores, ya que presenta un rango de oscilación entre 4.0 y 5.5 ml/min. Al igual que las otras columnas, se presenta tres valores extremos que demuestran un descenso y aumento del caudal en las fechas 28 de julio, 13 de agosto y 21 de Noviembre

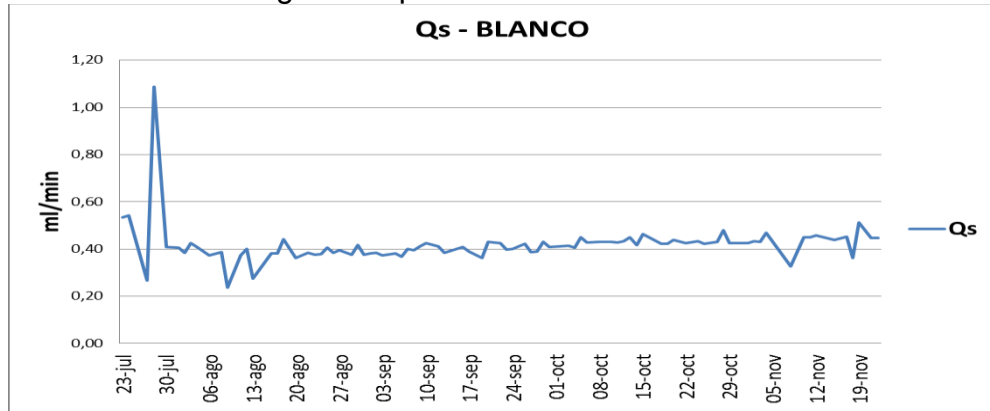
La columna de suelo en la cual se manejó una concentración de 1500 ppm, se observan remociones que oscilan en un mismo rango, sin embargo se tienen dos valores significativos que se relacionan con las mediciones realizadas los días 20 Agosto y 4 Noviembre. Paralelo a esto, se calcula un promedio de remoción de 236.6 mg/L, indicando una menor remoción en comparación con las tres anteriores, aunque con un valor muy cercano al encontrado en la columna con concentración de 1000 ppm. Demostrando posiblemente una disminución en la efectividad del surfactante a elevadas concentraciones.

El comportamiento del caudal que se observa de la fecha 31 de Agosto a la fecha 20 de Octubre, coincide con los valores de remoción encontrados durante este fecha, teniendo así pequeñas fluctuaciones antes de realizar el cuarto y quinto monitoreo de G&A

El valor de G&A encontrado en la segunda medición, es soportado bajo el destape de la columna realizado en la fecha 10 de Agosto, lo cual ocasionó un arrastre mayor de contaminación que se ve reflejado en los resultados de este análisis.

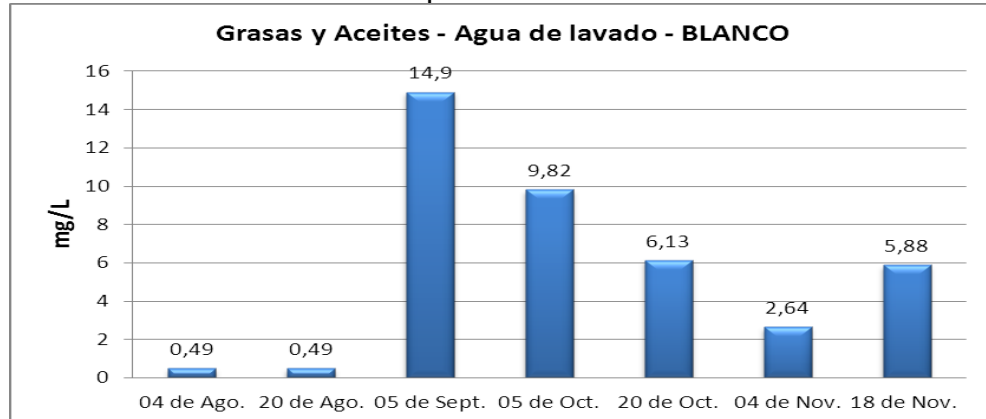
Al analizar los resultados del 20 de agosto para todas las columnas, se puede apreciar que esta fecha fue la que mayor arrastre de contaminante presento para todas, en comparación con las demás mediciones; exceptuando los resultados generados en la columna [250ppm], la cual presento su mayor remoción en la fecha 5 de septiembre.

Ilustración 38. Caudal registrado para la columna BLANCO



Fuente: Autor

Ilustración 39. Resultados de G&A para la columna BLANCO



Fuente: Autor

Con los resultados obtenidos en los análisis de G&A de la columna patrón, la cual se trabajó sin ninguna concentración de surfactante, se aprecian niveles bajos de remoción durante el tiempo total del lavado y una remoción máxima de 14.9 mg/L. A partir de esta se presenta un declive en la extracción de hidrocarburos, exceptúan la última fecha en la que se incrementó la remoción debido a las fluctuaciones de caudal donde se aprecian dos alzas luego de la fecha 4 de Noviembre.

De igual forma, se observa que los valores obtenidos para esta columna son superados por todas las concentraciones de surfactante utilizadas, demostrando al tiempo un rango de diferencia bastante significativo.

Al calcularse un promedio con los resultados obtenidos durante el tiempo total de lavado para el blanco, se obtiene un valor de 7.02 mg/L, que comparándose con los promedios de la otras columnas, hace que se resalte la efectividad del TRITON X-100 en cuanto a remociones de hidrocarburos.

El comportamiento del caudal en la columna –Blanco– fue constante durante el periodo total del lavado, presentando pequeñas fluctuaciones en las fechas 9 y 13 de Agosto, y en los días finales del lavado.

Al comparar los caudales registrados en todas las columnas, se aprecia un comportamiento similar durante los cuatro meses de lavado, también se observa fluctuaciones leves de caudal entre un rango de 4.5 y 5.5 ml/min. Finalmente, se presenta algunos aumentos considerables, como los registrados los días 28 de Julio, para todas las columnas; y el 21 de Noviembre para todas las concentraciones exceptuando el blanco. Siendo estas fluctuaciones de caudal las principales causas de la variación del G&A en las muestras de agua.

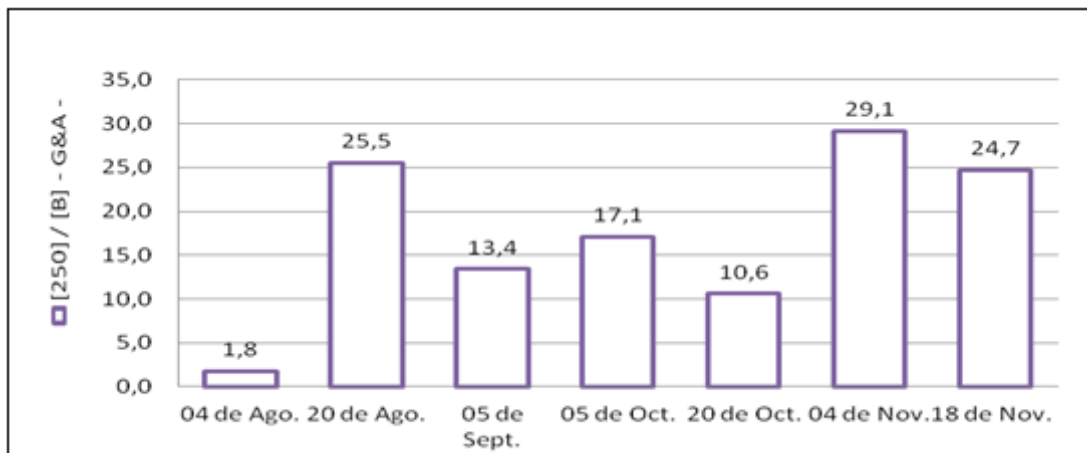
5.13 RELACION ENTRE LA CONCENTRACION DE G&A EN CADA COLUMNA Y LA CONCENTRACION G&A DEL BLANCO.

Con el fin tener un visión más clara de los resultados arrojados por los análisis de G&A en agua y poder conocer la concentración más efectiva o la que más remociones logro hacer en la muestra de suelo, se compararon los resultados obtenidos de G&A en cada una de las columnas, $[G\&A_{\text{cada columna}}]$, con los resultados obtenidos en el agua de lavado del suelo control, $[G\&A_{\text{Blanco}}]$.

La comparación se realizó tomando los valores determinados de G&A en cada fecha y se dividieron por el valor determinado en el blanco, en la misma.

A continuación en la ilustración 40 se muestran los resultados de la comparación expuestos en gráficas.

Ilustración 40. Relación $[G\&A_{250ppm}] / [G\&A_{\text{Blanco}}]$



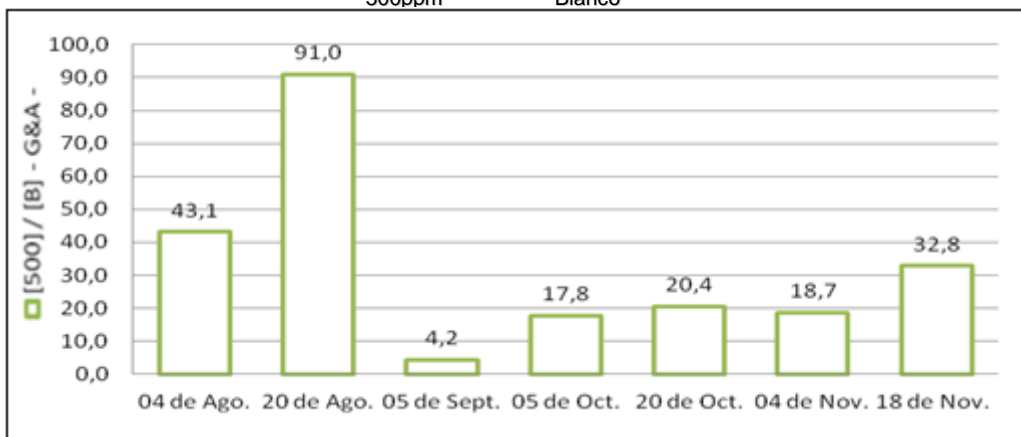
Fuente: Autor

La grafica obtenida a partir de la comparación de los resultados de G&A procedentes de la columna [250ppm] y $[G\&A_{\text{Blanco}}]$, demuestra claramente mayores remociones a una concentración de surfactante de 250ppm.

Al observar cada una de las fechas de monitoreo, se aprecian valores que indican remociones, 10 veces mayor a lo logrado en el blanco; sin tener en cuenta el valor encontrado en la fecha 4 de Agosto, la cual presenta un descenso, ya que coinciden las fechas de menor remoción para ambas columnas.

Finalmente, al determinar un promedio entre los valores obtenidos para esta columna, se encuentra que a una concentración de 250 ppm, se logró una remoción 17.4 veces mayor a la obtenida en la columna patrón. Siendo el resultado coherente ya que el surfactante mejora la Desorción y solubilidad de los hidrocarburos en la matriz suelo, logrando una mejor transferencia de los compuestos orgánicos, de la fase solida a la acuosa, formando micelas.

Ilustración 41. Relación $[G\&A_{500ppm}] / [G\&A_{\text{Blanco}}]$



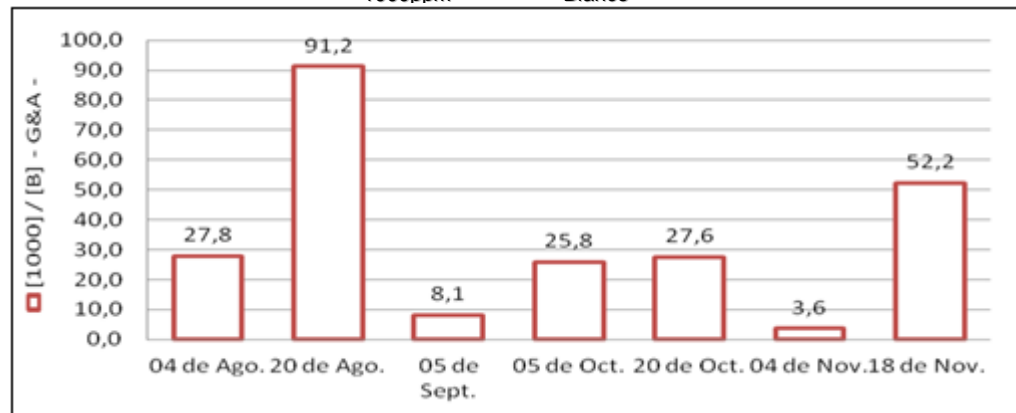
Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en la segunda comparación $[G\&A_{500ppm}] / [G\&A_{\text{Blanco}}]$, demuestran valores de remoción aún mayores que los encontrados en el primer análisis. Paralelo, se observan dos valores extremos que corresponden a las

fechas 20 de Agosto, donde coinciden el menor valor de G&A en el blanco y el mayor valor de concentración de G&A en la columna analizada; y 5 de Septiembre, en la cual se presenta la remoción más bajas para [500 ppm] y la más alta en el Blanco.

Finalmente se observa un promedio de remoción de 33 veces mayor a lo alcanzado en la columna control, lo cual ubica la concentración de 500ppm, por encima de 250 ppm en cuanto a efectividad.

Ilustración 42. Relación $[G\&A_{1000ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$



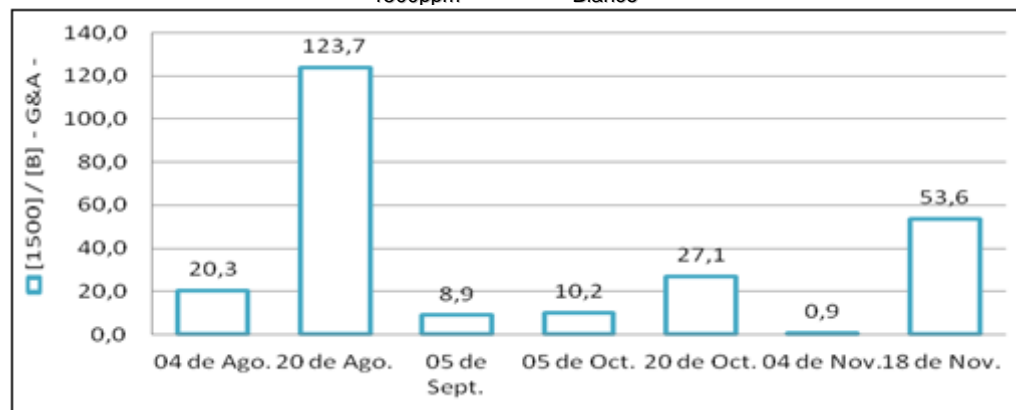
Fuente: Autor

Los valores determinados en la relación contenido de G&A para la columna [1000ppm] y $[G\&A_{Blanco}]$, demuestran una serie de oscilaciones durante el tiempo total de lavado, sin embargo se puede apreciar un incremento en los valores con relación a la columna anterior, lo que indica una mayor cantidad de hidrocarburos removidos en el suelo.

Al calcular un promedio entre los valores reportados en la Ilustración 42, se obtiene una cantidad de 34 veces mayor remoción, lo que demuestra un valor superior a los determinados en las relaciones $[G\&A_{250ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$ y $[G\&A_{1000ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$.

Basados en lo anterior y los resultados expuesto por [Susana Zeppieri, Yurimia Ramírez, Jessica Molina y Aura L. López de Ramos – 2009] donde se concluye, una reducción significativa del valor de tensión interfacial entre la mezcla Agua - Triton X-100 – hidrocarburo a medida que se aumenta la concentración del surfactante y teniendo presente que, la adsorción no solo se limita a interfaces liquido-liquido, liquido-gas, sino también, a las interfaces liquido-solido (Arboleda, Fabiá -2007), se puede decir que hasta este punto, dentro de la investigación, a medida que se incrementa la concentración del surfactante se aumenta la remoción de hidrocarburos en el suelo.

Ilustración 43. Relación $[G\&A_{1500ppm}] / [G\&A_{Blanco}]$



Fuente: Autor

En la Ilustración 43, la cual relaciona los resultados de G&A de la concentración 1500 ppm y $[G\&A_{Blanco}]$, se observan relaciones de remoción significativas como la calculada en la fecha 20 de Agosto, en donde se aprecian valores de 100 veces más remoción que en el blanco.

Aunque en las fechas restantes no se presentan valores tan elevados como en la fecha 20 de agosto, se lograron obtener relaciones de remoción considerables.

Si bien, en todas las fechas se obtuvieron remociones superiores a las encontradas en el blanco, exceptuando la fecha 04 de Noviembre donde se presume hubo un error en el análisis, presentando un valor incongruente con las

otras fechas; los valores obtenidos no son muy lejanos e incluso algunos son inferiores a los calculados en la columna de concentración 1000 ppm.

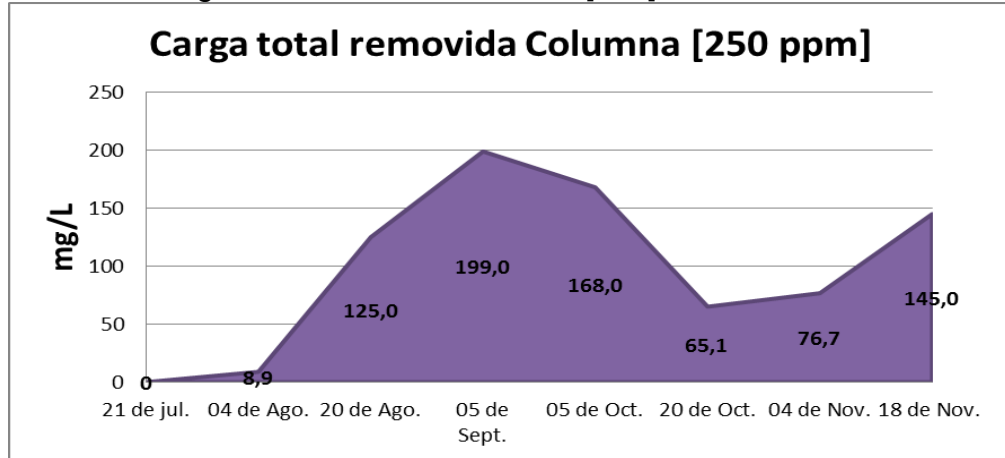
Relacionando el análisis anterior, con los valores promedios calculados para las concentraciones 250 ppm – 500 ppm y 1000ppm (17 – 33 – 34 respectivamente), junto con el valor promedio calculado para la columna 1500ppm, el cual se ubicó en 35 veces más remociones que el blanco; se presume que el surfactante Tritón X-100 posee una concentración límite, ubicada en 1000 ppm, a la cual hace la mayor remoción de hidrocarburos y al superarse esta, la efectividad en cuanto a remoción, empieza a tornarse constante.

5.14 ANALISIS DE CARGA.

Con el objetivo de dar un análisis final a los resultados de G&A determinados en cada una de las columnas, se identificó la carga total removida de grasas y aceites, a partir de las concentraciones obtenidas en cada fecha de monitoreo y el volumen de agua de lavado recogido en el mismo tiempo.

A continuación se muestran las gráficas arrojadas y los resultados obtenidos a partir de éstas.

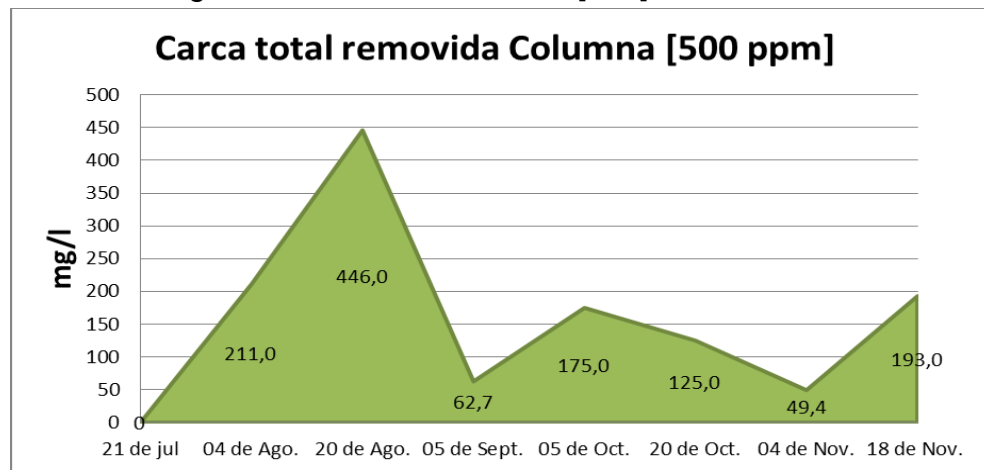
Ilustración 44. Carga Contaminante Columna [250]



Fuente: Autor

Área bajo la curva 13.5986 gr/ Lt - 4 meses
 Volumen Agua de Lavado 83.97 Lt
Carga 1141.87 gr – 4 meses

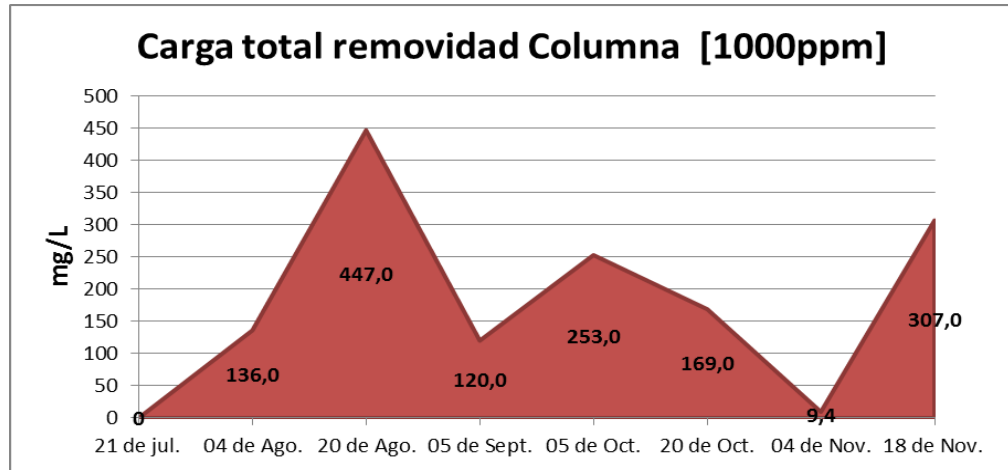
Ilustración 45. Carga Contaminante Columna [500]



Fuente: Autor

Área Bajo La Curva 19.7288 gr/ Lt - 4 meses
 Volumen Agua de Lavado 83.16 Lt
Carga 1640.65 gr – 4 meses

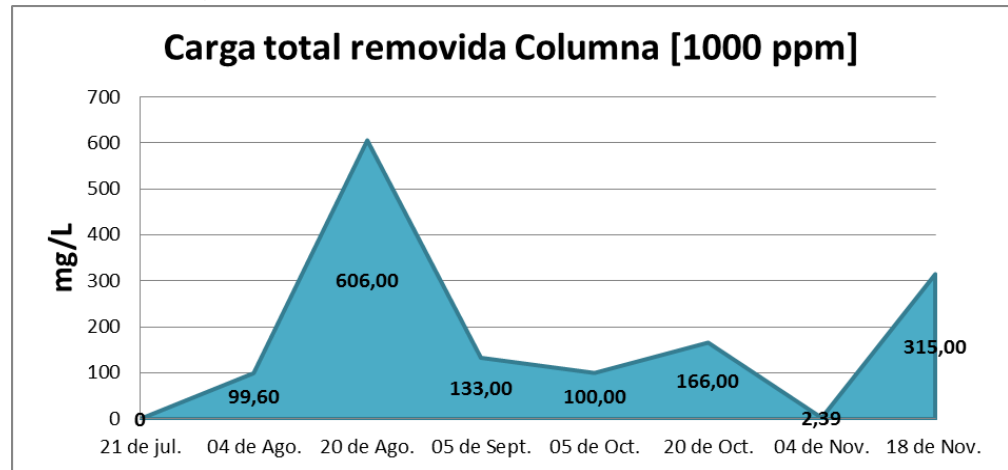
Ilustración 46. Carga Contaminante Columna [1000]



Fuente: Autor

Área Bajo La Curva 22.5328 gr/ Lt - 4 meses
 Volumen Agua de Lavado 82.31 Lt
Carga 1854.67 gr – 4 meses

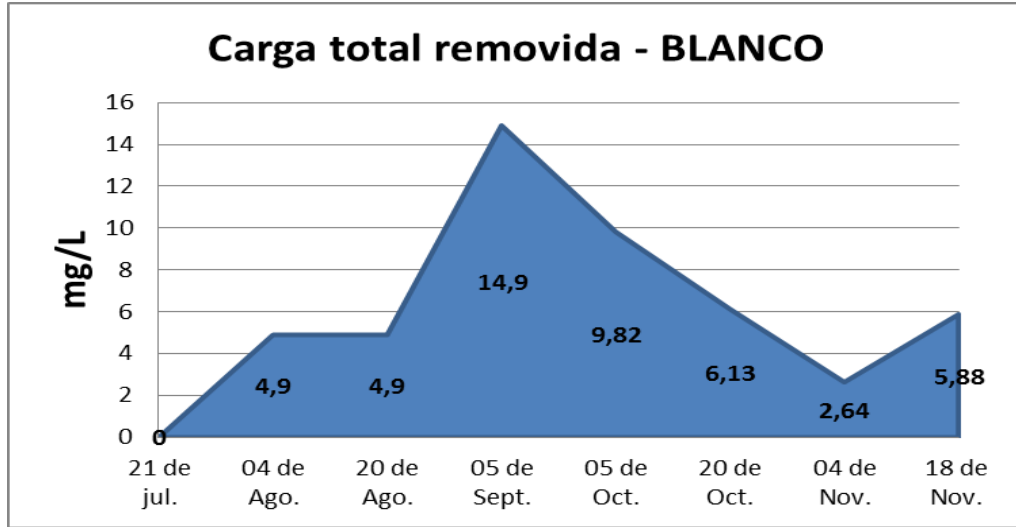
Ilustración 47. Carga Contaminante Columna [1500]



Fuente: Autor

Área Bajo La Curva 21.2784 gr/ Lt - 4 meses
 Volumen Agua de Lavado 85.10 Lt
Carga 1810.80 gr – 4 meses

Ilustración 48. Carga Contaminante Columna BLANCO



Fuente: Autor

Área Bajo La Curva 0.8894 gr/ Lt - 4 meses
 Volumen Agua de Lavado 70.61 Lt
Carga 62.80 gr – 4 meses

Tabla 26. Carga removidas de G&A.

[250 ppm]	[500 ppm]	[1000 ppm]	[1500 ppm]	Blanco
1141.87 gr	1640.65 gr	1854.67 gr	1810.80 gr	62.80 gr

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en este análisis de carga, demuestran una remoción significativa en cada una de las columnas al hacerse una comparación con los resultados obtenidos en el blanco. Demostrando así, la efectividad del surfactante Tritón X-100 en la remoción de los Hidrocarburos en el suelo.

Al compararse los resultados de carga obtenidos en cada columna, se observa un aumento en el valor de carga al aumentarse la concentración del surfactante a 1000 ppm. Luego de esto, se presenta un descenso de la carga removida a una

concentración de 1500 ppm, demostrando una diferencia de 43.87 gr por debajo de la columna anterior.

Teniendo en cuenta el análisis anterior, el comportamiento del surfactante a diferentes concentraciones en el lavado de suelo, demostró un aumento de las remociones, a medida que se aumentó la concentración del mismo; sin embargo, se presume que el tensoactivo Tritón X-100 presenta un límite de concentración para remover hidrocarburos; es decir, superada la concentración de 1000 ppm la eficiencia del surfactante empieza a disminuir, ocasionando al mismo tiempo, que el nivel de carga removida baje.

A continuación en la tabla 27. se muestra un resumen de los resultados obtenidos a partir del análisis de G&A y carga total removida

Tabla 27. Resumen de resultados obtenidos en el análisis de G&A y carga total removida

ANÁLISIS	[250 ppm]	[500 ppm]	[1000 ppm]	[1500 ppm]	[Blanco]
[G&A]	129 mg/L	180,3 mg/L	238,6 mg/L	236,6 mg/L	7,02 mg/L
$\frac{[G\&A_{\text{cada columna}}]}{[G\&A_{\text{Blanco}}]}$	17,4	33	34	35	
Carga Total Removida	1141,87 gr	1640,65 gr	1854,67 gr	1810,80 gr	62,80 gr

Fuente: Autor

Los resultados expuestos en la tabla 27, demuestran un incremento en las remociones de hidrocarburos a medida que se aumenta la concentración del surfactante Tritón X-100 en la técnica lavado de suelo; sin embargo se aprecia una disminución de los valores de [G&A] y Carga Total Removida al aplicarse una

concentración de 1500 ppm, indicando una disminución de la efectividad del tensoactivo luego de sobrepasarse la concentración de 4 veces la CMC.

En la relación entre $[G\&A_{\text{cada columna}}] / [G\&A_{\text{Blanco}}]$, se observan remociones superiores, en cada una de las columnas con concentración, de 17 veces la lograda en la columna patrón; demostraron así la efectividad del surfactante en la remoción de hidrocarburos del suelo.

6. CONCLUSIONES

- Basados en el diagnóstico de la zona contaminada, elaborado a partir de información del área de influencia directa e indirecta, se determinó que los mecanismos y controles implementados para detener y monitorear la pluma contaminante, no son suficientes para reducir la contaminación y evitar una posible afectación en áreas ecológicamente susceptibles del municipio.
- Los resultados obtenidos en la caracterización físico química del suelo, demostraron una variación poco significativa en sus propiedades a causa de los hidrocarburos; exceptuando el %CO donde se presenta un valor elevado debido a la alta concentración de HC en la muestra. Las leves variaciones en algunas de las propiedades tales como HG, HV y %Pt, son asociadas a los procesos de pre-tratamiento efectuados a la muestra antes de su análisis.
- Apoyados en la metodología y procedimientos adoptados para realizar el análisis físico químico del suelo, junto con los resultados obtenidos; se comprendió la importancia de tener presente los factores que puedan variar los resultados de la caracterización del suelo tales como: cantidad, toma, preservación y almacenamiento de la muestra, fechas, puntos de muestreo y clima.
- Se demostró la alta capacidad que posee el surfactante Triton X-100 en la remoción de hidrocarburos mediante la técnica lavado de suelo; al compararse los resultados de G&A obtenidos en cada columna con concentración y los resultados de la columna patrón.
- La concentración de G&A y la carga total removida determinada en cada una de las columnas, indicaron que a mayor concentración de TRITON X-100 es

posible remover mayor cantidad de hidrocarburos del suelo; Existiendo una limitante, en donde al exceder la concentración de 1000 ppm se ve afectada la capacidad de extracción del surfactante.

- Los resultados y análisis presentados en este proyecto, indicaron que el surfactante TRITON X-100 a concentraciones mayores a su CMC remueve cantidades de hidrocarburos significativas a través de la técnica lavado de suelo, demostrando así viabilidad para la proyección de este método de remediación en campo.

7. RECOMENDACIONES

- Controlar el caudal de agua manejado dentro de las columnas para evitar variaciones extremas
- Implementar un tiempo mayor de lavado, con el objetivo de tener una tendencia continua en los resultados de remoción de la contaminación.
- Realizar las mediciones de TPH en el agua de lavado y suelo utilizado, a través de un método directo en el cual se determine específicamente este parámetro.
- Realizar la caracterización fisicoquímica del suelo antes y después de aplicarse la técnica de remediación lavado de suelo, con el fin de analizar la incidencia del surfactante sobre sus propiedades.
- Efectuar pruebas sobre la velocidad mínima de lavado, en busca de garantizar el movimiento de las partículas, evitando así el taponamiento del sistema.
- Implementar un tratamiento de remediación en el agua de lavado procedente de las columnas, con el objetivo de remover los hidrocarburos extraídos del suelo y el surfactante usado en la técnica.
- Realizar un investigación sobre la biodegradación del Tritón X-100 adsorbido en el suelo; y como este proceso incide en la remoción de los hidrocarburos que continúan adheridos al suelo tratado.

- Realizar investigaciones sobre la efectividad del surfactante Tritón X-100 en la remediación de suelos contaminados a diferentes concentraciones de Hidrocarburos.
- Aplicar la técnica de remediación lavado de suelo, a escala laboratorio, con montajes por triplicado con el fin de obtener mayor precisión en los datos obtenidos.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] HILLEL, Daniel; (1998); Environmental Soil Physics; The United States of America. (PAG. 3, 4)
- [2] DÍEZ DE ULZURRUN, M. (1995); CONTAMINACION Y DEPURACION DE SUELOS; Instituto Tecnológico GeoMInero de España, Madrid, PAG 13, 14, 17
- [3] GONZALEZ, Susana; ALCALA, Luis Rafael; CONTAMINACIÓN (2006); INSTITUTO UNIVERSITARIO POLITÉCNICO “SANTIAGO MARIÑO”; Republica Bolivariana de Venezuela.
- [4] PAGINA WEB, ECOPETRO; Fecha de Consulta: 21/08/2011 URL: <http://www.ecopetrol.com.co/english/contenido.aspx?catID=169&conID=36898>
- [5] PÁGINA WEB, DEPARTAMENTO DE EDAFOLOGIA Y QUIMICA AGRICOLA UNIVERSIDAD DE GRANADA ESPAÑA; Fecha de consulta 25/08/2011 URL: <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema01/factform.htm>
- [6] PORTA CASANELLAS, Jaime; LOPEZ-ACEVEDO REGUERÍN, Marta; ROQUERO DE LABURU, Carlos (2003); EDAFOLOGIA Para la agricultura y el medio ambiente; 3a edición, España. PAG 165, 311
- [7] B. McBRIDE, Murray (1994); ENVIRONMENTAL CHEMISTRY OF SOILS; New York, The United States of America. PAG (56, 57
- [8] PÁGINA WEB, ESCULA DE INGENIERIA EN CONSTRUCCION – PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO, CHILE; Fecha de consulta 31/08/2011; URL:http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/hu medad.pdf

- [9] MUSKUS, Angélica María; MANUAL DE LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA; COLOMBIA. PAG 22
- [10] RUCKS, L; GARCIA, F; KAPLÁN, A; PONCE DE LEON, J; HILL, M; (2004) PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO; FACULTAD DE AGRONOMIA, UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA; Uruguay.
- [11] PAGINA WEB; CROSARA, Alicia; FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA, URUGUAY, FECHA DE CONSULTA 31/08/2011; URL: <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Practico%203.pdf>
- [12] JORDAN, Antonio; (2005 – 2006) MANUAL DE EDAFOLOGIA; DEPARTAMENTO DE CRISTALOGRAFIA, MINEROLOGIA Y QUIMICA AGRICOLA DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA; España.
- [13] PÁGINA WEB; FACULTAD DE CIENCIAS – UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA, URUGUAY, FECHA DE CONSULTA 31/08/2011; URL: <http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Nutrientes%20del%20suelo.pdf>
- [14] ULLOA GUITIÁN, M; ABREU, C.A; PAZ GONZÁLEZ, A;(2001) DISPONIBILIDAD DE MACRO- Y MICRONUTRIENTES EN UN SUELO DE CULTIVO DE MABEGOND; España – Brasil.
- [15] PÁGINA WEB; INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA; ANALISIS FISICO Y QUIMICO DEL SUELO; MEXICO; FECHA DE CONSULTA 5/09/2011; URL: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/509/analisis.pdf>
- [16] FISHER, Paul R; MANEJO DE pH EN MEDIOS SIN SUELO; UNIVERSITY OF NEW HAMPSHIRE; The United States.
- [17] SÁNCHEZ V. Héctor; ASPECTOS FISICOS Y QUIMICOS DEL SUELO; FACULTAD DE AGRONOMIA; UNIVERSIDAD DE CONCEPCION; Chile.
- [18] MIRSAL, Ibrahim A; SOIL POLLUTION Origin, Monitoring & Remediation; 2004; Dellenburd, Germany.

[19] HERNANDEZ FERNANDEZ, María Tereza; Usos alternativos para lodos procedentes de la depuración de aguas residuales urbanas: biorrecuperación de suelos contaminados con hidrocarburos; CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS; 2007; España.

[20] SAVAL, Susana; Exitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos; Universidad Nacional Autónoma de México; Ciudad de México.

[21] GONZALEZ, Luis Eduardo; Con US\$ 600 millones Ecopetrol afronta derrames; EL TIEMPO; Fecha de consulta: 20/09/2011; URL: http://www.eltiempo.com/economia/empresas/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-9562304.html

[22] Colombia mantiene récord de producción de petróleo en mayo; PORTAFOLIO.CO; Fecha de Consulta: 28/09/2011; URL: <http://www.portafolio.co/negocios/colombia-mantiene-record-produccion-petroleo>

[23] OBREGON, Adriana Milena; ACTIVIDADES DE RECUPERACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN CAMPO PALAGUA; Instituto Colombiano de Petróleos; Bucaramanga, Colombia.

[24] VOLKE SEPÚLVEDA, Tania; TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS; Instituto Nacional de Ecología; 2002; México.

[25] MAROTO ARROYO, M^a Esther y ROGEL QUESADA, Juan Manuel; APLICACIÓN DE SISTEMAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS; Protección ambiental de suelos; España.

[26] VÁZQUEZ BRAVO, Bernardo; VARIACIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE UN SUELO RESTAURADO A TRAVÉS DE UN PROCESO

DE LAVADO CON SURFACTANTES; Universidad de las Américas Puebla (Escuela de Ingenierías); 2009; México.

[27] SALAGER, Jean-Louis y FERNANDEZ, Álvaro; CUADERNO FIRP S301-PP / MODULO DE ENSEÑANZA EN FENOMENOS INTERFACIALES; Universidad de los Andes (Facultad de Ingeniería – Escuela de Ingeniería Química); 2004; Mérida, Venezuela.

[28] PÁGINA WEB; INSTITUTO VENEZOLANO DEL ASFALTO; VENEZUELA; FECHA DE CONSULTA 22/12/2011; URL: <http://www.inveas.org.ve/>

[29] BENAVIDES LÓPEZ DE MESA, Joaquín; QUINTERO, Gladis; GUEVARA VIZCAÍNO, Andrea Liliana; JAIMES CÁCERES, Diana Carolina; GUTIÉRREZ RIAÑO, Sandra Milena; MIRANDA GARCÍA, Johanna; BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS DERIVADOS DEL PETRÓLEO; UNIVERSIDAD DE LA SALLE; Bogotá, Colombia.

[30] BRISSIO, Pedro Augusto; EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL ESTADO DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN DONDE SE EFECTÚAN ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN HIDROCARBURÍFERA; Universidad Nacional del Comahue; Argentina; 2005

[31] RODRIGUEZ, Hugo; SISTEMA DE LAVADO DE SUELOS CONTAMINADOS, MEMCAP S.A; Argentina.

[32] JOSUÉ MENDEZ, Esteban; Dr. RODRIGUEZ VALADEZ, Francisco Javier; EXTRACCION DE HIDROCARBUROS EN SUELOS CONTAMINADOS MEDIANTE EL ACOPLAMIENTO DEL LAVADO DE SUELO IMPLEMENTANDO UN SISTEMA EN COLUMNA; Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; México; 2006

[33] SAVA, Susana; UNA EXPERIENCIA DE CARACTERIZACIÓN Y REMEDIACIÓN DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS; Instituto de Ingeniería, UNAM; México.

[34] ORTINEZ BRITU, Oscar; IZE LEMA, Irina; GAVILAN GARCIA, Arturo; LA RESTAURACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN MEXICO; Ciudad de México; México.

[35] NOGUERA, Sikleb; ARMANDO, Arnald; EVALUACIÓN DE METALES EN SUELOS CONTAMINADOS POR DERRAMES DE CRUDO EN YARACAL, ESTADO FALCÓN; Venezuela; 2010.

[36] QUÍM. ARBOLEDA, Fabián; ING. VALENCIA, Carlos; ING. QUIÑONES, Luís; ING. GARCÍA, Ramiro; ING. REINOSO, Marcela; ING. CÁRDENAS, Valeria; TRATAMIENTO DE ARENAS EN FONDO DE POZO PRODUCTOR DE CRUDO, MEDIANTE EL USO DE AGENTE DISPERSANTE COMERCIAL SANDTREAT, PRODUCTO DERIVADO DEL ÁCIDO DODECIL BENZEN SULFÓNICO; 2007

[37] SUSANA ZEPPIERI, Yurimia Ramírez; JESSICA MOLINA; LÓPEZ DE RAMOS, Aura L; Estudio Experimental de la Tensión Interfacial Transitoria para Sistemas Alcanos-Agua-Tritón X-100 empleando la Técnica de la Gota Emergente; 2009; Caracas; Venezuela.

[38] G. I. Alba; D. A. Castellanos; M. G. García; M. C. Cuevas; E. Bustos; ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES DIFERENTES MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUR; 2010; Zacatecas; México.

[39] BIBLIOTECA VIRTUAL KANSAS STATE UNIVERSITY UNITED STATES OF AMERICA, FECHA DE CONSULTA: 07/03/2012. URL: <http://www.ksre.ksu.edu/library/crpsl2/mf2548s.pdf>

[40] BRAVO, Elizabeth; IMPACTOS DE LA EXPLOTACIÓN PETROLERA EN ECOSISTEMAS TROPICALES Y LA BIODIVERSIDAD; 2007; Ecuador.

[41] GARCIA, Inés; 2008; CONTAMINACIÓN DEL SUELO E IMPACTO AMBIENTAL; Departamento de edafología y química agrícola; España.

[42] PAGINA WEB: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGETICA; Normatividad ambiental y sanitaria; FECHA DE CONSULTA: 22/09/2011; URL: http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/normativ/normativ.htm

[43] PAGINA WEB: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO; FACULTAD DE QUIMICA; FECHA DE CONSULTA 15/12/2011; URL: <http://depa.fquim.unam.mx/~tunda/FORMACION%20MICELAR.html>

[44] LOZADA TORRES, Sandra Patricia; MANUAL DE LABORATORIO AGUAS RESIDUALES UNIVALLE; Santiago de Cali, Colombia. 2002