

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES EN SUELO
CONTAMINADO CON DIÉSEL B10 Y BIODIÉSEL APLICANDO LA TECNOLOGÍA
OSE II IMPLEMENTADA POR EOM CONSULTING S.A.S

LAURA MARÍA CABRERA LOBELO
MARÍA TERESA UNIBIO SALCEDO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES EN SUELO
CONTAMINADO CON DIESEL B10 Y BIODIESEL APLICANDO LA TECNOLOGÍA
OSE II IMPLEMENTADA POR EOM CONSULTING S.A.S

LAURA MARÍA CABRERA LOBELO
MARÍA TERESA UNIBIO SALCEDO

Proyecto de grado para recibir el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director:
Marco Antonio Rodríguez García
Ingeniero de Procesos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de aceptación:

Ing. Duvián Alberto Vera Romero

Ing. Angie Tatiana Ortega Ramírez

Bogotá D.C, Noviembre de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

DR. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

DR. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

DRA. ANA JOSEFA HERRERA

Decano de la Facultad de Ingenierías

ING. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

ING. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a Elaboración propia.

DEDICATORIA

Con cariño e infinito agradecimiento dedico este logro a Dios, quien una vez más supo guiarme por el buen camino, dándome fortaleza y sabiduría para superar las dificultades de esta ardua y fascinante travesía; cada problema lo convertiste en bendición y cada dificultad en lección.

A la más importante y fehaciente muestra de amor en mi vida, mi familia, quienes día a día estuvieron para mí brindándome su apoyo incondicional, especialmente a mis padres, a quienes debo todo lo que soy y puedo llegar a ser, esto es por y para ustedes... Gracias por creer en mí, son mi mayor fuente de inspiración.

A mi mejor amiga y compañera de tesis, Laura, gracias por estar incondicionalmente, por ayudarme a crecer y ser mejor persona; recuerda que amistades como la nuestra solo nacen en el cielo.

A todas las personas que conocí y marcaron esta bonita e inolvidable etapa de mi vida, gracias, la mujer que hoy soy también se debe a ustedes.

A la vida por este nuevo triunfo, gracias, esto continúa...

María Teresa.

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico ante todo a Dios, quien siempre ha estado presente en cada momento de mi vida y se encarga de guiar cada paso que doy, llenando cada día de infinitas bendiciones.

A mis padres, Lucho y Patty, por el apoyo incondicional en mi vida, por estar a mi lado para acompañarme y orientarme, por motivarme y enseñarme a luchar por los sueños, pero sobre todo a afrontar y aprender de las derrotas y a disfrutar los logros.

A mi hermana Nessa, por enseñarme a ver la vida sin prisa, por ser mi mejor cómplice de aventuras y la inspiración para no desfallecer en lo que hago.

A mi abuelo Humberto, quien me enseñó que se vale soñar pero sin perder la Fe en Dios. A él, gracias por darme la señal más clara que mi vida profesional iniciaba con la Ingeniería Química.

A María, por su amistad y apoyo en esta etapa mi vida, por motivarme a seguir adelante pese a las adversidades que se presenten.

Y a todos mis amigos y familiares, que me acompañaron en este proceso, gracias por los consejos, la motivación, el apoyo y la paciencia.

“La satisfacción radica en el esfuerzo, no en el logro. El esfuerzo total es una victoria completa”. Mahatma Gandhi

Laura María.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a:

La FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, especialmente a los docentes del programa de ingeniería química, quienes con su conocimiento y dedicación han contribuido en el proceso de formación como ingenieras, permitiéndonos crecer profesional e intelectualmente.

EOM CONSULTING S.A.S, por la oportunidad de desarrollar el trabajo de grado y permitir ampliar nuestro conocimiento, incursionando en la industria petroquímica y ambiental. Por el apoyo técnico y financiero, y, especialmente al Sr. Nicolás Rodríguez Sarmiento por su dedicación y asesoría.

Al Ing. MARCO ANTONIO RODRÍGUEZ GARCÍA, quien con su conocimiento, experiencia e incondicional acompañamiento permitió culminar este proyecto con éxito.

Al COMITÉ DE TRABAJO DE GRADO, por la revisión y recomendaciones para el mejoramiento de esta investigación.

Y a todas aquellas personas que con su colaboración participaron en el desarrollo de esta investigación, hacemos extensivo nuestro más sincero agradecimiento.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	23
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	26
1. CONTEXTUALIZACIÓN	27
1.1 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO	27
1.1.1 Refinería de Cartagena	27
1.1.2 Refinería de Barrancabermeja	27
1.2 PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN COLOMBIA	29
1.3 NORMATIVIDAD DE MEZCLA PARA EL DIÉSEL	30
1.3.1 Resolución 40184 de 2018	30
1.3.1.1 Plantas productoras de Biodiésel	31
1.3.1.2 Distribuidores de combustibles	31
2. MARCO DE REFERENCIA	32
2.1 MARCO TEÓRICO	32
2.1.1 Suelo	32
2.1.2 Contaminación del suelo	34
2.1.2.1 Contaminación del suelo con diésel	36
2.1.2.2 Contaminación del suelo con biodiésel	37
2.1.3.1 Biorremediación asistida	42
2.1.3.2 Biodegradación de diésel y biodiésel como contaminantes	43
2.1.3.3 Factores que condicionan la biorremediación	46
2.1.4 Métodos de Laboratorio	48
2.1.4.1 Método de Bouyoucos (Método del Hidrómetro)	48
2.1.4.2 Método SM 5520-E	51
2.2 MARCO LEGAL	54
2.2.1 Norma Louisiana 29B	56
3. ESPECIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO PARA LA EVALUACIÓN	57
3.1 DISTRIBUCIÓN DE COMBUSTIBLE	57
3.1.1 Sistemas de poliductos	57
3.1.2 Incidentes con pérdidas de contención	59
3.1.2.1 Localización del Sistema Pozos Colorados – Ayacucho – Galán	60
3.2 SELECCIÓN DEL SUELO	62
3.2.1 Permeabilidad	65
3.2.2 Prueba textural en campo	67

3.3 ANÁLISIS DEL SUELO	71
3.3.1 Análisis Físico	71
3.3.2 Análisis de parámetros estipulados por la norma Louisiana 29B	72
4. INFLUENCIA DE OSE II EN LA DESCONTAMINACIÓN DEL SUELO	74
4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	74
4.1.1 Factores, niveles y variable respuesta	74
4.1.1.1 Identificación y selección de factores y niveles	74
4.1.1.2 Variable de respuesta	79
4.1.2 Prueba de hipótesis	79
4.2 MATRIZ DE EXPERIMENTOS	80
4.3 MONTAJE EXPERIMENTAL	81
4.3.1 Distribución del suelo	81
4.3.2 Toma de muestras del suelo sin contaminante	82
4.3.3 Contaminación del suelo	83
4.3.4 Aplicación de la tecnología OSE II	84
4.3.5 Volteo y toma de muestras	88
4.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
4.4.1 Resultados	89
4.4.2 Análisis de varianza	93
4.4.3 Análisis de resultados	96
4.3.3 Análisis de los mejores escenarios	98
5. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO	103
5.1 PANORAMA ACTUAL EOM CONSULTING S.A.S	103
5.2 PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN	105
5.2.1 Análisis de parámetros físicos	106
5.2.2 Control del contenido de humedad	107
5.2.3 Dosificación y tiempo de tratamiento	111
5.3 EQUIPOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	112
5.3.1 Fast Tank	114
5.3.2 Motobomba	114
5.3.3 Bomba fumigadora de aspersion	115
5.3.4 Excavadora	116
5.3.5 pHmetro	116
6. ANÁLISIS FINANCIERO	118
6.1 COSTOS OPERACIONALES	118
6.1.1 Equipos y Maquinaria	118
6.1.2 Personal	119
6.1.3 Consumibles	120
6.2 COMPARATIVO DE COSTOS	121

6.2.1 Costos EOM CONSULTING S.A.S.	121
6.2.2 Costos con modificaciones propuestas	122
6.2.3 Costo por metro cúbico	123
6.3. INDICADORES ECONÓMICOS	124
6.3.1 Valor Presente Neto (VPN)	125
6.3.2 Tasa interna de Retorno (TIR)	125
7. CONCLUSIONES	127
8. RECOMENDACIONES	128
BIBLIOGRAFÍA	130
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama triangular de las clases texturales	33
Figura 2. Tipos de hidrocarburos presentes en el diésel	37
Figura 3. Reacción de transesterificación	38
Figura 4. Esquema de biorrecuperación asistida	43
Figura 5. Ruta de degradación de los alcanos por reacción bioquímica	44
Figura 6. Estructura molecular de éster metílico de ácido graso del biodiésel	45
Figura 7. Esquema general de la degradación de ácidos grasos a CO ₂ y H ₂ O	47
Figura 8. Montaje para la extracción Soxhlet	52
Figura 9. Localización de los puntos 8 y 9 en el sistema Pozos Colorados – Ayacucho – Galán	62
Figura 10. Localización de los puntos 8 y 9 en el departamento del Cesar, mediante shapefile en QGIS	64
Figura 11. Diagrama de velocidad de infiltración de agua	66
Figura 12. Procedimiento para identificar la textura del suelo en campo	69
Figura 13. Suelos seleccionados para determinación de a textura al tacto	70
Figura 14. Diagrama de proceso para la reducción de TPH en el suelo	103
Figura 15. Llenado de fast tank con agua suministrada por carro tanque	105
Figura 16. Proceso de aplicación de OSE II y aireación del suelo mediante montaje de red de tubería PVC (izq.) y proceso de aplicación de OSE II a través de bomba fumigadora y aireación del suelo mediante volteo mecánico por medio de excavadora (der.)	106
Figura 17. Diagrama de proceso para la reducción de G&A en el suelo	107
Figura 18. Diagrama de proceso para la reducción de la concentración de grasas y aceites en el suelo	113
Figura 19. Costos propuestos por EOM CONSULTING S.A.S.	122
Figura 20. Costos de la operación con las modificaciones propuestas	123

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Combustibles obtenidos en la refinería de Cartagena	28
Tabla 2. Combustibles obtenidos en la refinería de Barrancabermeja	28
Tabla 3. Compuestos del suelo con relación al color	34
Tabla 4. Interpretación de la porosidad total del suelo	35
Tabla 5. Interpretación de la permeabilidad del suelo	35
Tabla 6. Características técnicas del diésel corriente B2/B4 distribuido por las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja	37
Tabla 7. Características técnicas del biodiésel a partir de Aceite de palma	39
Tabla 8. Límites permisibles en la Norma Louisiana 29B	56
Tabla 9. Sistemas de poliductos donde transita Diésel	58
Tabla 10. Número de válvulas ilícitas	60
Tabla 11. Número de atentados en los últimos cuatro años	60
Tabla 12. Derrames de Diésel reportados por CENIT, 2018-2019	61
Tabla 13. Coordenadas geográficas angulares de los puntos 8 y 9	62
Tabla 14. Coordenadas decimales de los puntos 8 y 9	63
Tabla 15. Clasificación del grupo de textura media	65
Tabla 16. Análisis físico del suelo a trabajar	71
Tabla 17. Parámetros de la norma Louisiana 29B del suelo a trabajar	72
Tabla 18. Variables involucradas en la biorremediación con OSE II	74
Tabla 19. Resultados de grasas y aceites para el suelo sin contaminar	82
Tabla 20. Resultados de Grasas y Aceites iniciales (t0)	85
Tabla 21. Volumen contaminado con grasas y aceites de cada muestra	86
Tabla 22. Volumen de la tecnología OSE II a utilizar en cada muestra	86
Tabla 23. Volumen de Agua a utilizar en cada muestra	87
Tabla 24. ANOVA diseño factorial 3x2 para la disminución de la concentración de G&A	94
Tabla 25. Información inicial del caso de estudio	118
Tabla 26. Costos de alquiler de los equipos y maquinaria de la operación	119
Tabla 27. Cálculo de costos de mano de obra por mes	119
Tabla 28. Costos de elementos de protección personal	120
Tabla 29. Costos de remediación por metro cúbico	124

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Principales técnicas de recuperación de suelos, mediante tratamientos biológicos	41
Cuadro 2. Normatividad internacional ambiental acogida por Colombia	55
Cuadro 3. Interpretación de la tasa de permeabilidad del grupo de textura media	67
Cuadro 4. Tratamiento de grasas y aceites atendido por EOM CONSULTING S.A.S	77
Cuadro 5. Relación de dosificación OSE II respecto a los días de tratamiento	78
Cuadro 6. Factores y niveles del diseño experimental	80
Cuadro 7. Matriz del diseño factorial	81
Cuadro 8. Volumen de contaminante a agregar en los recipientes plásticos con suelo	84
Cuadro 9. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:25	90
Cuadro 10. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:37,5	91
Cuadro 11. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:50	92
Cuadro 12. Porcentaje de reducción de grasas y aceites del día 0 al día 28	93
Cuadro 13. Interpretación con la prueba de hipótesis	95
Cuadro 14. Mejores escenarios del desarrollo experimental con sus respectivos porcentajes de reducción en el día 28.	98
Cuadro 15. Parámetros de la norma Louisiana 29B y caracterización física para las muestras D1.3, D2.3, B1.1 y B2.2	99
Cuadro 16. Interpretación de los datos obtenidos en el cuadro 15, de los parámetros	100
Cuadro 17. Especificaciones técnicas balanza de humedad MB23	109
Cuadro 18. Especificaciones técnicas Fast Tank TFT11000	114
Cuadro 19. Especificaciones técnicas motobomba MBPMD20	115
Cuadro 20. Especificaciones técnicas fumigadora estacionaria diésel 437-178F	115
Cuadro 21. Especificaciones técnicas Excavadora 320	116
Cuadro 22. Especificaciones técnicas medidor de pH digital PCE-PH 26F	117
Cuadro 23. Costos de materiales consumibles en una operación de biorremediación de grasas y aceites	121

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Expresiones para calcular porcentajes de Arena, Arcilla y Limo.	50
Ecuación 2. Cálculo del contenido de grasas y aceites en peso seco	53
Ecuación 3. Porcentaje de reducción del proyecto Aguachica (Cesar)	77
Ecuación 4. Cálculo de días para obtener 1% en G&A en proyecto Aguachica (Cesar)	78
Ecuación 5. Cálculo del volumen de suelo contaminado con grasas y aceites	85
Ecuación 6. Contenido de humedad del suelo	108
Ecuación 7. Cálculo de peso del suelo seco	108
Ecuación 8. Cálculo de peso del suelo húmedo, con humedad igual o mayor al 30%	109
Ecuación 9. Peso de agua en suelo húmedo	110
Ecuación 10. Volumen total de agua requerida	110
Ecuación 11. Unidades volumétricas de diésel B10 remediadas por unidad volumétrica de OSE II	111
Ecuación 12. Estimación de la concentración de grasas y aceites de suelo contaminado con diésel B10 en función del tiempo	112
Ecuación 13. Estimación de la concentración de grasas y aceites de suelo contaminado con biodiésel en función del tiempo	112
Ecuación 14. Costo de remediación por metro cúbico	123
Ecuación 15. Valor presente neto	125

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Producción de combustibles en Colombia en los años 2012-2018	29
Gráfica 2. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:25	90
Gráfica 3. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:37,5	91
Gráfica 4. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:50	92

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Homogeneización del suelo	82
Imagen 2. Suelo saturado con diésel B10 (Izq.) y biodiésel (Der.)	83
Imagen 3. Distribución de los recipientes del suelo contaminado con diésel y biodiésel	84
Imagen 4. Bomba pulverizadora con mezcla de OSE II y Agua	87
Imagen 5. Aplicación de la mezcla de OSE II y Agua, a una muestra	88
Imagen 6. Diagrama de flujo del proyecto con las modificaciones propuestas proyectado a 5 años.	125

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Mapa de la infraestructura petrolera de ECOPETROL S.A	137
Anexo B. Presencia de grupos texturales a nivel departamental	138
Anexo C. Grupos texturales en Colombia	139
Anexo D. Interpretación de las tasas de permeabilidad	140
Anexo E. Resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo	141
Anexo F. Cálculo de la densidad aparente en campo	149
Anexo G. Cálculo del volumen de contaminante	150
Anexo H. Aplicación de la tecnología OSE II	152
Anexo I. Seguimiento fotográfico del desarrollo experimental	157
Anexo J. Formato de Cadena de custodia	160
Anexo K. Resultados del análisis Grasas y Aceites	161
Anexo L. Porcentajes de reducción de grasas y aceites	172
Anexo M. Fórmulas aplicadas en el análisis de varianza (ANOVA)	173
Anexo N. Ficha técnica del biodiésel	176
Anexo O. Ficha técnica del OIL SPILL EATER II (OSE II)	177
Anexo P. Equipos	178

ABREVIATURAS

OSE	oil spill eater
kbd	mil barriles diarios
%	porcentaje
API	American Petroleum Institute
bdc	barriles días calendario
kbdc	miles barriles día calendario
bpd	barriles por día
kbpd	miles barriles por día
in / “	pulgadas
msnm	metros sobre el nivel del mar
mm	milímetro
°C	grados Celsius
mg	miligramo
Kg	kilogramo
g	gramos
m	metro
dS	decisiemens
TPH	hidrocarburos totales del petróleo
ml	mililitro
ppm	partes por millón
L	litro
G&A	grasas y aceites
SSC	suelo sin contaminar
LB	línea base
D1	diésel primera repetición
D2	diésel segunda repetición
B1	biodiésel primera repetición
B2	biodiésel segunda repetición
.1	dosificación relación 1:25
.2	dosificación relación 1:37.5
.3	dosificación relación 1:50
ft	pies
lb	libra
psi	libra de fuerza por pulgada cuadrada
h	hora
lbf	libra fuerza
m.c.a	metro de columna de agua
gal	galones
HP	caballo de fuerza
cm	centímetro
rpm	revoluciones por minuto
min	minutos

GMR	gasolina motor regular
GPR	gasolina de protección
GLP	gas licuado del petróleo
FAME	éster metílico de ácido grado
NATI	nafta importada
>	mayor que
.	separador de miles
,	separador de decimales

GLOSARIO

ACEM: diésel extra, diésel Premium o aceite combustible para motores de bajo contenido de azufre.

ANALITO: componente, elemento, compuesto o ion de interés analítico en una muestra.

B2E: diésel de bajo contenido de azufre y con una concentración de 2% de biodiésel.

B2: diésel con una concentración de 2% de biodiésel.

B4: diésel con una concentración de 4% de biodiésel.

BIOCOMBUSTIBLE: combustible para el transporte derivado de fuentes renovables como plantas y animales.

COMBUSTIBLE: material o sustancia que tras un proceso de combustión es capaz de liberar energía potencial que se transforma en energía utilizable de diversos tipos.

CONCENTRACIÓN: medida de la cantidad de materia de un compuesto en específico en una mezcla o solvente, este se puede expresar en unidades másicas, de volumen o ambas.

CICLO BIOGEOQUÍMICO: proceso donde se produce la circulación de materia inorgánica entre los organismos vivos y el medio ambiente. Se trata del reciclaje de nutrientes minerales entre la biósfera, la atmósfera, la hidrósfera y la litosfera.

DOSIFICACIÓN: cantidad de una sustancia requerida para producir un efecto.

EDÁFICO: relativo al suelo; resultante de o influido por factores del suelo o de otros substratos en lugar de por factores climáticos.

ENZIMA: molécula de proteínas que tienen la capacidad de facilitar y acelerar las reacciones químicas que tienen lugar en los tejidos vivos.

JET A1: combustible utilizado en las turbinas de los motores a reacción en aviación civil. Es un kerosene que procede de la destilación del crudo de petróleo. Su función principal es suministrar potencia al avión, siendo parámetros clave su contenido energético y la calidad de combustión.

KEROSENE: derivado del petróleo recuperado por destilación, considerado como un aceite ligero de color amarillento, su porcentaje de pureza varía de crudo en crudo.

MICROORGANISMO: ser vivo o sistema biológico que solo puede visualizarse mediante un microscopio.

NAFTA: hidrocarburo líquido, incoloro, volátil y muy inflamable que se obtiene de la destilación del petróleo crudo. Se emplea como combustible en los motores de combustión interna y como disolvente.

QGIS: Sistema de Información Geográfica de código abierto que soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

PROTOPLASMA: parte fundamental y viva de la célula, comprende todo su interior, es decir, el núcleo más el citoplasma; se encuentra en estado coloidal y está compuesto mayoritariamente por agua (75 -80%), así como por proteínas (10 – 15%), enzimas, sustancias grasas (grasa neutra, fosfolípidos, colesterol), carbohidratos y sales inorgánicas o electrolitos.

SHAPEFILE: formato sencillo y no topológico utilizado para almacenar la ubicación geométrica e información de atributos de entidades geográficas.

SOXHLET: técnica convencional de extracción de tipo sólido líquido a través de compuestos solventes volátiles por medio de un montaje que se compone de un receptor o recipiente contenedor de solvente, un contenedor de muestra con escape tipo sifón y un condensador.

SUBSTRATO: sustancia sobre la que actúa una enzima.

TECNOLOGÍA: conjunto de conocimientos y técnicas que se aplican de manera ordenada para alcanzar un determinado objetivo o resolver un problema.

TRATAMIENTO: hace referencia a las condiciones o circunstancias a las cuales se expone una muestra durante un experimento.

UNIDAD CARTOGRÁFICA: subdivisión del mapa del suelo. Pueden consistir en uno o más tipos de suelo.

RESUMEN

Esta investigación se realizó para demostrar la efectividad de la tecnología OSEII en la remoción de grasas y aceites en un suelo contaminado con diésel B10 y biodiésel en un periodo de tratamiento de 28 días.

Para dar inicio a la evaluación, a partir de un reporte entregado por CENIT en el que se especifican los derrames de diésel ocurridos en suelo en Colombia durante el año 2018 e inicio de 2019 y un análisis de los tipos de suelo presente en estas zonas afectadas, se elige la clase textural del suelo que se va a trabajar en la fase experimental.

Posteriormente se da inicio al desarrollo experimental contaminando el suelo escogido con diésel B10 y biodiésel. Para determinar la concentración inicial de grasas y aceites en cada uno de los escenarios se toman muestras, las cuales se llevan a analizar en el laboratorio HIDROLAB, donde por medio de una extracción Soxhlet, se obtienen los resultados, teniendo como promedio un 25% y 28% para el suelo contaminado con diésel B10 y biodiésel, respectivamente. Con base a esto, se realizan las respectivas dosificaciones de la tecnología OSEII, las cuales son reducidas en un 25% y 50% respecto a la estándar, dándose así inicio al proceso de biorremediación.

Durante el tratamiento, se realizan periódicamente análisis de laboratorio para dar seguimiento a la reducción de la concentración de grasas y aceites y, mediante la aplicación de un diseño de experimentos se determina la influencia de las diferentes relaciones de dosificación así como del tipo de contaminante sobre la concentración de grasas y aceites en el suelo.

Finalmente y con base a los resultados, se establecen los requerimientos técnicos para llevar el proceso de biorremediación con la tecnología OSEII a escala piloto, especificando los equipos y maquinaria pertinente, asimismo, se realiza un análisis de costo de remediación por metro cúbico tanto de las propuestas planteadas como de la metodología que actualmente implementa EOM CONSULTING S.A.S.

Palabras clave: Biorremediación, Tecnología OSEII, Suelo, Diésel B10, Biodiésel

INTRODUCCIÓN

Actualmente las actividades relacionadas con los combustibles líquidos derivados del petróleo, como almacenamiento, distribución y transporte, pueden presentar situaciones de emergencia a causa de fallas humanas, fenómenos naturales, o alteraciones de orden público, originando impactos negativos a los recursos naturales, agua y/o suelo, y comunidades aledañas, ya que estos combustibles presentan características inflamables y tóxicas. Es por esto que se debe contar con un plan de accionamiento para afrontar la ocurrencia de un evento de tal magnitud, minimizando los riesgos presentes al igual que los impactos ambientales.

El presente proyecto se realizó para la empresa EOM CONSULTING S.A.S, la cual está comprometida con el medio ambiente y se dedica a la descontaminación In Situ y manejo de material contaminado, sin afectar las comunidades aledañas al evento y respetando el ecosistema. Este compromiso se efectúa a través del uso de la tecnología OSE II (Oil Spill Eater II), ya que es recomendada para limpiar hidrocarburos y sustancias contaminantes orgánicas. Esta tecnología (ver ficha técnica de OSE II en anexo O) es un sistema biocatalítico de concentrado líquido multienzimático (como proteasas y amilasas) y azúcares (melaza) que acelera las reacciones biológicas naturales, y al combinarse con agua y oxígeno descompone rápidamente el petróleo u otras sustancias orgánicas, obteniendo de este proceso dióxido de carbono y agua.

Dicho lo anterior, la investigación busca evaluar la efectividad de la tecnología en la biorremediación de suelos contaminados con diésel B10 (90% diésel de origen fósil – 10% biodiésel) para analizar la reducción de grasas y aceites, y así comprobar su efectividad no solo en la reducción de hidrocarburos (TPH), sino también en los demás componentes del diésel, como lo es el biodiésel; de igual forma se desarrolla el experimento para suelos contaminados con biodiésel puro, ya que al provenir de aceite de palma, se asume una concentración de grasas y aceites propiamente de los ácidos grasos presentes en el biocombustible.

Para tal fin se realizó una evaluación de la tecnología con diferentes concentraciones de esta en los dos escenarios planteados y se tomó un rango de tiempo de 28 días para evaluar el comportamiento del parámetro de interés (Grasas y Aceites), para posteriormente elegir la mejor proporción de dosificación basada en el criterio de mayor reducción de concentración de grasas y aceites a los 28 días. Adicionalmente, se realiza la caracterización de parámetros planteados por la Norma Louisiana 29B (ya que Colombia, al no contar con una norma de límites permisibles, la autoridad ambiental se rige por esta norma, la cual estipula los valores límite de contaminantes en suelos afectados por hidrocarburos o sus derivados) antes y después de contaminar el suelo.

Por último, se realiza el análisis de los requerimientos técnicos junto con una evaluación financiera a través del dimensionamiento de este proceso a escala piloto.

En el siguiente documento se presentará el planteamiento, desarrollo y evaluación de la efectividad de la tecnología OSE II en la remediación de grasas y aceites de suelos contaminados tanto con diésel B10 como con biodiésel puro, desde un enfoque técnico a través de las herramientas suministradas por la ingeniería química.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la remoción de grasas y aceites en suelo contaminado con Diésel B10 y Biodiésel aplicando la tecnología OSE II implementada por la empresa EOM CONSULTING S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Especificar el tipo de suelo para la evaluación.
- Determinar la influencia de la dosificación de OSE II en la concentración de grasas y aceites de suelo contaminado.
- Establecer los requerimientos técnicos necesarios en un proceso a escala piloto.
- Realizar un análisis financiero de la implementación de la tecnología OSE II para la remoción de grasas y aceites en suelo contaminado.

1. CONTEXTUALIZACIÓN

En el presente capítulo, se lleva a cabo una breve descripción acerca de la producción de combustibles líquidos derivados del petróleo en Colombia, estadísticas de producción de los mismos y normatividad de mezcla del combustible de interés. Adicionalmente se especifican detalles acerca del producto de mezclado, como plantas productoras y distribuidores.

1.1 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO

Se sabe que el sector del petróleo es uno de los impulsores de la economía del país¹, centrando esta responsabilidad a Ecopetrol S.A, ya que cuenta con la participación mayoritaria no solo de la producción de crudo, sino del transporte y refinación a nivel nacional.

La refinación del petróleo consiste en transformar los hidrocarburos en productos que tengan tanto un valor energético como un valor agregado, garantizando así la demanda y consumo de combustibles y petroquímicos que exige el país. Esto se logra a través de las dos refinerías con mayor producción: Reficar (Refinería de Cartagena) y la Refinería de Barrancabermeja.

1.1.1 Refinería de Cartagena. Tiene una capacidad de carga de 150 kbd de crudo, cuenta con una conversión de productos mayor al 97% y, tiene la suficiencia de abastecer el mercado nacional y exportar excedentes de combustible y coque a mercados internacionales.² Los combustibles producidos en esta refinería se presentan en la tabla 1.

1.1.2 Refinería de Barrancabermeja. Esta refinería cuenta con una capacidad de carga de 250 kbd de crudo y tiene una conversión de productos mayor al 80%, el alcance de su producción abastece el mercado nacional y exporta excedentes de fuel oil y petroquímicos al mercado internacional.³ Los productos combustibles obtenidos en esta refinería se presentan en la tabla 2.

¹ REYES, G. (27 de mayo de 2019). Aumento del PIB no se traduce en oportunidades para la población. *Portafolio*. Recuperado de: <https://www.portafolio.co/economia/de-colombia-en-2019-sectores-y-factores-en-el-crecimiento-de-la-produccion-529986>

² ECOPETROL S.A. [sitio web]. Cartagena: ECOPETROL, Refinería de Cartagena. [Consulta: 5 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/Nueva-Refineria-de-Cartagena/Una%20refiner%C3%ADa%20m%C3%A1s%20amigable%20con%20el%20medio%20ambiente>

³ ECOPETROL S.A. [sitio web]. Barrancabermeja: ECOPETROL, Refinería de Cartagena. [Consulta: 5 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/complexo-barrancabermeja>

Tabla 1. Combustibles obtenidos en la refinería de Cartagena

Productos	Producción (kbd)
Diésel	70
Gasolinas	27
Jet	12
GLP	3.5

Fuente: ECOPETROL S.A. [sitio web]. Cartagena: ECOPETROL, Refinería de Cartagena. [Consulta: 5 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/Nueva-Refineria-de-Cartagena/Una%20refiner%C3%ADa%20m%C3%A1s%20amigable%20con%20el%20medio%20ambiente>

Tabla 2. Combustibles obtenidos en la refinería de Barrancabermeja

Productos	Producción (kbd)
Gasolinas	60
Diésel	65
Jet	23
Fuel Oil	20
GLP	6

Fuente: ECOPETROL S.A. [sitio web]. Barrancabermeja: ECOPETROL, Refinería de Cartagena. [Consulta: 5 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/complejo-barrancabermeja>

La producción de los combustibles líquidos obtenidos está determinada por el tipo de crudo característico del país: crudos pesados e intermedios. Entre ellos, los principales crudos son Castilla Blend, Vasconia y South Blend, con grados API de 18, 23 y 28, respectivamente.⁴

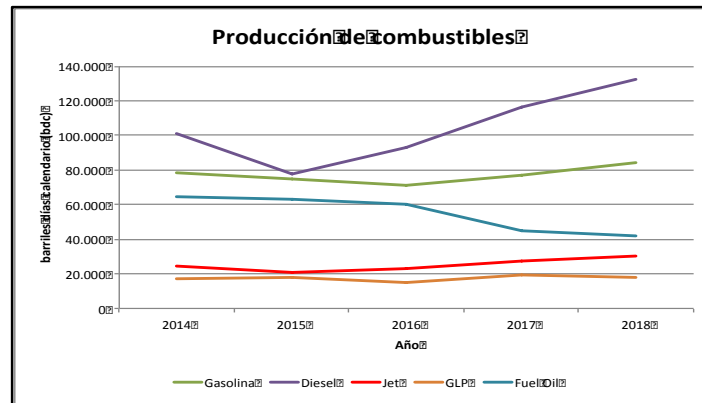
En el proceso de refinación, son utilizadas torres de destilación en las que se fracciona el crudo y se obtienen los productos mencionados en las tablas 1 y 2. Esto se hace aprovechando la diferencia en los puntos de ebullición que presentan los distintos componentes del crudo, generándose así un gradiente de temperatura que permite obtener productos volátiles y pesados, los cuales son extraídos de la parte superior, inferior y lados de la torre, según corresponda.

⁴ ECOPETROL. Reporte integrado de Gestión sostenible 2018. En: Comercial y Mercadeo. [En Línea]. p. 159. Recuperado en 2019-07-21. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/Asamblea2019/reporte-integrado-gestion-sostenible-2018.pdf>

1.2 PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN COLOMBIA

A partir del Boletín Estadístico de Minas y Energía del 2018, elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), se presenta en la gráfica 1 la producción de combustibles entre los años 2012-2018.

Gráfica 1. Producción de combustibles en Colombia en los años 2012-2018



Fuente: UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Boletín estadístico de minas y energías 2018. En: Producción de combustibles. 2016-2018. [en línea]. Recuperado en 2019-08-30. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Bol-etines/Boletin_Estadistico_2018.pdf

De la Gráfica 1 se infieren dos aspectos importantes: los combustibles que lideran el mercado nacional son diésel y gasolina respectivamente, y, a partir del año 2015, la producción de Diésel ha presentado una fuerte tendencia de crecimiento, posicionándose así como el combustible de mayor producción en Colombia. Ambos combustibles son utilizados comúnmente en el sector de transporte en motores de combustión interna, y la principal diferencia en el uso de estos radica en el proceso de combustión; en un motor diésel, el proceso inicia porque el aire en la fase de compresión alcanza una temperatura alta, y en los motores de gasolina, el proceso surge por la chispa que genera la bujía en el interior del cilindro.

Debido a esto, los motores diésel son de uso obligatorio en operaciones industriales, ya que disminuyen el riesgo de accidentalidad al contar con una mecánica más robusta y fiable, además de tener mayor seguridad en caso de colisión, ya que el diésel no explota como la gasolina. Contrario ocurre con los motores de gasolina, ya que al manejar un proceso de combustión “explosiva” y de “detonación prematura” aumentan la probabilidad del riesgo asociada generalmente a incendios.

Sin embargo, existen otras razones por las que el diésel tiene mayor producción y consumo frente a otros combustibles. Una de estas es el poder calorífico, entendido como la cantidad de calor liberado en la combustión por unidad de masa o volumen utilizado de combustible⁵; teniendo así mayor demanda aquel combustible con mayor rendimiento energético, es decir, que haya mayor liberación de energía por unidad de volumen. En promedio la gasolina tiene un poder calorífico de 115.400 BTU/GALÓN y el diésel de 138.000 BTU/GALÓN⁶; por esto, el diésel es mayormente usado en los motores de combustión interna, ya que requiere menor consumo y su eficiencia es más alta.

1.3 NORMATIVIDAD DE MEZCLA PARA EL DIÉSEL

Por combustión, se entiende el proceso mediante el cual se produce la quema de cualquier sustancia ya sea sólida, líquida o gaseosa. En general, los productos resultantes de una combustión son: calor, vapor de agua, cenizas y gases. En el caso del diésel, al ser un derivado del petróleo, contiene cerca de un 75% de hidrocarburos saturados y un 25% de hidrocarburos aromáticos, y, todos los productos de la combustión de fósiles (a excepción del agua) son considerados como contaminantes atmosféricos, entre ellos monóxido de carbono y dióxido de carbono principalmente.

Con el fin de reducir estas emisiones de gases contaminantes en el proceso de combustión que contribuyen al aumento del efecto invernadero, en Colombia se han creado resoluciones para mezclar el diésel de origen fósil con Biodiésel, el cual proviene de materia prima agrícola (aceite de palma), mitigando así este impacto ambiental al crear un equilibrio entre la emisión de gases al quemar el combustible y la reabsorción de estos durante el crecimiento de la cosecha siguiente, es decir, las plantas mediante la fotosíntesis se encargan de tomar el dióxido de carbono presente en el aire y posteriormente expulsar oxígeno.

A continuación, se presenta la resolución que decreta el porcentaje de mezcla del Diésel.

1.3.1 Resolución 40184 de 2018. En el artículo 1º se establece que a partir del 1 de Marzo del 2018 se deben distribuir mezclas que contengan 10% de

⁵ FERNÁNDEZ, Jorge. Cátedra Máquinas térmicas. [En Línea]. Recuperado en 2019-07-25. Disponible en: http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf

⁶ GAS Y ENERGÍA. [Sitio Web]. Valle del Cauca: Canasta Energética. [Consulta: 10 Agosto 2019]. Disponible en: <http://www.gasyenergia.com/datos-tecnico>

⁷ COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 40184 de 2018. (28, febrero, 2018). Por la cual se modifica la Resolución 182142 de 2007, en relación con el porcentaje de mezcla de biocombustible para uso en motores diésel, en Bogotá, D.C., centro del país y llanos orientales. Bogotá: El Ministerio.

biocombustible para motores diésel con un 90% de diésel fósil, denominadas B-10; y aquellas plantas que cuenten con mezclas B-8 pueden distribuir el producto hasta el 10 de Marzo de 2018, y posteriormente debe hacerse el ajuste de la mezcla señalado por la resolución.

1.3.1.1 Plantas productoras de Biodiésel. Para abastecer la demanda de Biodiésel requerido para la mezcla con diésel y dar cumplimiento con lo estipulado en la resolución mencionada, Colombia cuenta con 11 plantas productoras de Biodiésel en funcionamiento distribuidas en diferentes departamentos del territorio nacional: Magdalena, Cesar, Atlántico, Cundinamarca, Santander y Meta.

En conjunto, estas plantas cuentan con una capacidad total de 906.000 toneladas por año⁸, teniendo la mayor participación de producción y capacidad la empresa BioD, ubicada en Facatativá (Cundinamarca), aportando con el 22,08% en la capacidad de producción a nivel nacional.

1.3.1.2 Distribuidores de combustibles. Los clientes finales del combustible adquieren este producto con las especificaciones técnicas y de calidad, por medio de estaciones de servicios localizadas en gran cantidad en el territorio nacional.

Estas estaciones hacen parte de los distribuidores de combustibles y a nivel nacional se cuenta con 18 compañías, donde tres de ellas tienen el 77,7% de participación de combustibles en el país, según cifras de Fendipetróleo. Estos distribuidores mayoristas son Organización Terpel, Primax y Biomax, cada una con una participación del 44,9%, 22,4% y 10,4%, respectivamente.⁹

⁸ FEDEBIOCOMBUSTIBLES. [Sitio web]. Plantas productoras de biodiesel en funcionamiento. [Consulta: 17 agosto 2019]. Disponible: www.fedebiocombustibles.com

⁹ VALORA ANALITIK. (21 de marzo de 2019). Tres compañías tienen más del 75% de mercado de distribución de combustibles. *Valora Analitik*. Recuperado de: <https://www.valoraanalitik.com/2019/03/21/tres-companias-tienen-mas-del-75-de-mercado-de-distribucion-de-combustibles/>

2. MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se presenta la fundamentación teórica necesaria que tiene como objetivo conectar de manera acertada el contexto investigativo con el contexto experimental: al igual que la fundamentación legal, relacionada con el proyecto.

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Suelo. La importancia del suelo arraiga principalmente en el hecho de ser un elemento natural vivo y dinámico, estableciendo la interfaz entre la atmósfera, litósfera biósfera e hidrósfera¹⁰, con las que interactúa constantemente al realizar un intercambio de energía y materia, convirtiéndolo así en un elemento clave del ciclo biogeoquímico. Además, a él se atribuyen funciones esenciales de carácter socioeconómico y medioambiental.

A manera general, todos los tipos de suelo están constituidos por los mismos elementos: materia orgánica (5%) e inorgánica (45%), agua (25%) y aire (25%)¹¹. Sin embargo, la variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente del mismo, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes que, a su vez, están controlados por factores de formación (el clima, la región geográfica, la vegetación, la roca que los originó y modificaciones antropogénicas).

Acorde a esto, las propiedades químicas (Capacidad de intercambio catiónico – CIC, pH)¹² y físicas del suelo difieren entre sí; estas últimas se describen a continuación.

- **Estructura:** Es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. La estructura afecta a un numeroso grupo de características físicas: afecta directamente la aireación, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión¹³, pero sobre todo controla la porosidad

¹⁰ JORDÁN LÓPEZ, Antonio. Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla, 2006. [en línea]. Disponible en:

<http://files.infoagroconstanza.webnode.es/200000017c2dccc3d62/edafologia%20del%20suelo.pdf>

¹¹ Ibid., p. 15.

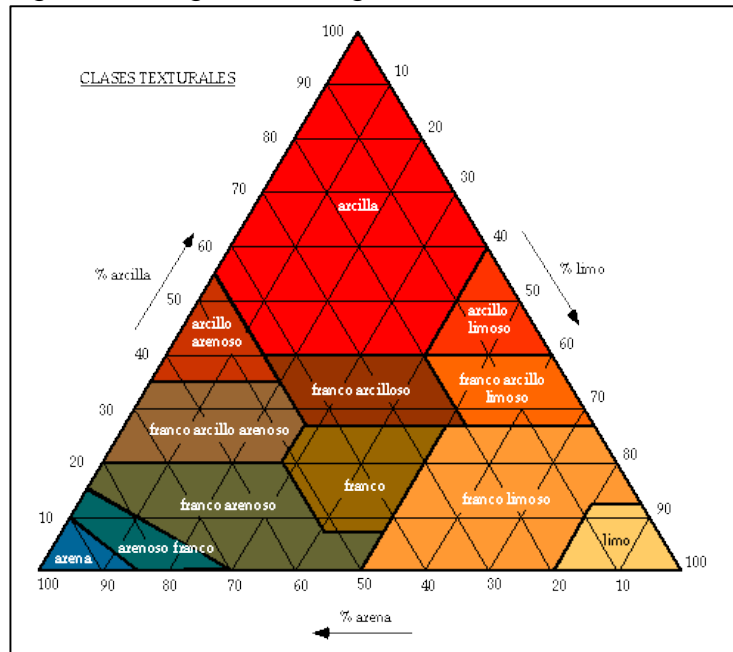
¹² RAMÍREZ, Roberto. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. 1 ed. Produmedios, calidad editorial y audiovisual agropecuaria. Santafé de Bogotá, D.C., septiembre de 1997. pp. 12-13.

¹³ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Propiedades físicas del suelo. Estructura. [sitio web]. FAO.[Consulta: 15 agosto 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/home/es/>

del mismo. Desde un aspecto morfológico, la estructura del suelo se define por una forma, un tamaño y un grado de manifestación de los agregados¹⁴.

- **Textura:** Se puede definir como la relación existente entre los contenidos de las diferentes fracciones granulométricas que constituyen el suelo: arena, limo y arcilla. Es una propiedad importante ya que influye en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades. El triángulo de textura de suelos según la FAO, se presenta en la figura 1 y se usa como una herramienta para clasificar la textura.

Figura 1. Diagrama triangular de las clases texturales



Fuente: IBÁÑEZ, Sara y MORENO-RAMÓN, Héctor. La textura de un suelo. [en línea]. 2010. Valencia (España): ReserchGate, Universidad Politécnica de Valencia. [Consultado 6 mayo 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/50839531_La_textura_del_suelo

- **Color:** Depende de sus componentes y puede usarse como una manera indirecta para determinar otras propiedades. Este varía con el contenido de humedad, materia orgánica y grado de oxidación de minerales presentes. Entre más negro sea un suelo, más productivo es. En la tabla 3, se presenta el tipo de color que puede presentar el suelo y la composición presente en él que puede ocasionar el color.
- **Consistencia:** Esta propiedad define la resistencia del suelo a la deformación o ruptura. Según la resistencia y humedad, el suelo puede ser suave, duro o

¹⁴JORDÁN LÓPEZ, Antonio. Op. cit., p. 66.

muy duro. La medición de esta propiedad se hace mediante tres niveles de humedad: aire-seco, húmedo y mojado¹⁵.

Tabla 3. Compuestos del suelo con relación al color

Color	Compuestos
Rojo	Óxidos de hierro y manganeso
Amarillo	Óxidos de hierro hidratado
Gris y blanco	Cuarzo, yeso y caolín
Negro y marrón	Materia orgánica

Fuente: IBÁÑEZ, Sara y MORENO-RAMÓN, Héctor. El color del suelo. [en línea]. 2010. Valencia (España): ReserchGate, Universidad Politécnica de Valencia. [Consultado 6 mayo 2019]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8008/Color%20del%20suelo.pdf>

- **Densidad:** Se refiere al peso por volumen de suelo y se relaciona con la porosidad: un suelo poroso será menos denso que uno poco poroso. Existen dos tipos de densidad: real y aparente. La primera no incluye el volumen de los poros, la segunda sí.
- **Porosidad:** El espacio poroso se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos, y pueden distinguirse macro y micro poros, por los que agua, aire, nutrientes y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros son responsables del drenaje y los micro poros del almacenamiento de agua. En la tabla 4 se presenta la interpretación de la porosidad, acorde al porcentaje que pueda presentar el suelo.
- **Permeabilidad:** Es una propiedad asociada a la porosidad; la permeabilidad es la facilidad que tiene el suelo para dejarse penetrar por fluidos. Sobre la permeabilidad influyen tres factores importantes: la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica. El agua fluye en el suelo debido a varios tipos de fuerzas como gravedad, ascenso capilar y osmosis. En la tabla 5, se presenta la interpretación de las diferentes tasas de permeabilidad que puede presentar el suelo, desde una textura arcillosa hasta arenosa.

2.1.2 Contaminación del suelo. Se define como contaminante a aquella sustancia o forma de energía presente en una cantidad y concentración suficiente de tal modo que pueda provocar un desequilibrio (reversible o irreversible) en el medio con el que interactúa. Generalmente, a un contaminante siempre se le atribuyen consecuencias negativas y casi siempre proviene de fuentes antropogénicas.¹⁶

¹⁵ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. Op. cit.

¹⁶ BERMÚDEZ, Mauricio. Contaminación y Turismo Sostenible. Clasificación de los contaminantes. 01 de enero 2010. Pág. 6.

Tabla 4. Interpretación de la porosidad total del suelo

Porosidad total (%)	Interpretación
< 31	Muy baja
31 – 45	Baja
45 – 55	Media
55 – 63	Alta
> 63	Muy alta

Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Suelos y tierras de Colombia. En: *Propiedades físicas fundamentales*. Tomo II. Bogotá: IGAC, 2016. p. 31. ISBN: 978-9588323-85-5.

Tabla 5. Interpretación de la permeabilidad del suelo

Índice de permeabilidad (cm/h)	Interpretación
< 0,13	Muy lenta
0,13 – 0,3	Lenta
0,5 - 2	Moderadamente lenta
2 – 6,3	Moderada
6,3 – 12,7	Moderadamente rápida
12,7 - 25	Rápida
> 25	Muy rápida

Fuente: ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. [Sitio web]. FAO, Permeabilidad del suelo. [Consulta: 8 mayo 2019]. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

La clasificación de los contaminantes puede hacerse según su consistencia (líquido, sólido o gas), en función de la extensión de la fuente (puntual, lineal o difusa), su grado de degradabilidad (no degradables, degradación lenta o persistente, degradables y biodegradables) y el tipo de agente contaminante (físico, químico o biológico).

Existen muchos tipos de contaminación: atmosférica, hídrica, del suelo, térmica, radiactiva, entre otras. En lo concerniente a la contaminación de suelos, las sustancias contaminantes presentan características muy variadas; metales pesados, plaguicidas y fertilizantes, derivados del petróleo, residuos radiactivos, compuestos orgánicos, entre otros¹⁷.

La contaminación del suelo puede llegar a incidir de manera directa o indirecta sobre los seres vivos, por ejemplo y en el peor de los casos, cuando un agente contaminante produce una invasión extrema y satura el suelo, supera su

¹⁷ POLO, Alfredo; HERNÁNDEZ, Diana y FRITIS, Héctor. Contaminación y restauración de suelos. *Ciencia y Medio Ambiente*, 2002. pp.105-114.

capacidad de autodepuración provocando la contaminación de otros medios, bien sea hídrico o atmosférico, afectando aguas subterráneas o superficiales, acuíferos, sedimentos de los ríos, y aire.

2.1.2.1 Contaminación del suelo con diésel. En los últimos años, los hidrocarburos y derivados han sido una gran fuente de liberación de contaminantes al medio ambiente, afectando significativamente el ecosistema y dejando en la mayoría de los casos un daño irreparable.¹⁸ Algunos de los efectos de la presencia del petróleo y derivados en el suelo son la pérdida de la fertilidad del suelo, bajo rendimiento de cosechas, toxicidad en los organismos y afectaciones en propiedades físicas y químicas: cambios de pH, salinidad, compactación, reducción de nutrientes, pérdida de materia orgánica, etc.

Particularmente en Colombia, los derrames de diésel que se han presentado no obedecen únicamente a actividades realizadas por la industria petrolera, también se atribuye esta responsabilidad a grupos al margen de la ley y a la delincuencia común.

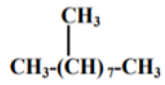
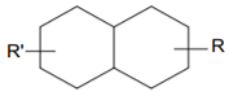
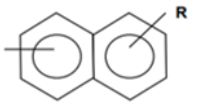
El diésel (derivado del petróleo) es una mezcla balanceada de hidrocarburos de tipo parafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos¹⁹ (Ver Figura 2).

- **Hidrocarburos parafínicos:** Son hidrocarburos saturados (alcanos). Solo presentan enlaces sencillos y pueden ser de cadena recta o ramificada.
- **Hidrocarburos olefínicos:** Contienen uno o más enlaces doble C-C.
- **Hidrocarburos nafténicos:** Son hidrocarburos cíclicos saturados.
- **Hidrocarburos aromáticos:** Son aquellos que poseen anillos bencénicos.

¹⁸ VELÁSQUEZ, Johana. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 01 de junio de 2017. vol. 8. pp.151-167. ISSN 2145-6097.

¹⁹ SHELL. Ficha de datos de seguridad. Diésel industrial (destilado). [en línea]. 1 ed. p.1. Disponible en: <http://www.ecosmep.com/cabecera/upload/fichas/4906.pdf>

Figura 2. Tipos de hidrocarburos presentes en el diésel

<p>Parafínicos</p> <p>$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-(CH}_2\text{)}_{13}\text{-CH}_3$</p> <p></p> <p>Heptametilnonano</p>	<p>Olefinicos</p> <p>$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH} = \text{CH}_2$</p> <p>Butileno</p> <p>$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$</p> <p>Etileno</p>
<p>Nafténicos</p> <p></p> <p>Derivados de decalina</p>	<p>Aromáticos</p> <p></p> <p>Derivados de naftaleno (Diaromáticos)</p>

Fuente: TRILLO, José. Características y comportamiento del diésel. En: Buenas prácticas de manejo de biodiésel y sus mezclas. 2011. [En línea]. Recuperado en: 2019-08-25. Disponible en: <https://www.fedebiocombustibles.com/files/Presentacion%20ECOPETROL.pdf>

Como se mencionó anteriormente, la normatividad colombiana establece que el diésel consumido en el país (ver características técnicas en la tabla 6) debe ser mezclado con biodiésel hasta cumplir con las especificaciones técnicas.

2.1.2.2 Contaminación del suelo con biodiésel. El biodiésel es un combustible líquido categorizado como biocombustible renovable, derivado de aceites vegetales o grasas animales obtenido a través de un proceso de transesterificación²⁰ (ver figura 3).

Tabla 6. Características técnicas del diésel corriente B2/B4 distribuido por las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja

Propiedad	Unidades	Especificación	
		Mínimo	Máximo
Agua y sedimento	ml/100 ml		0,05
Azufre	mg/Kg		50
Contenido de aromáticos	ml/100 ml		35
Cenizas	g /100g		0,01

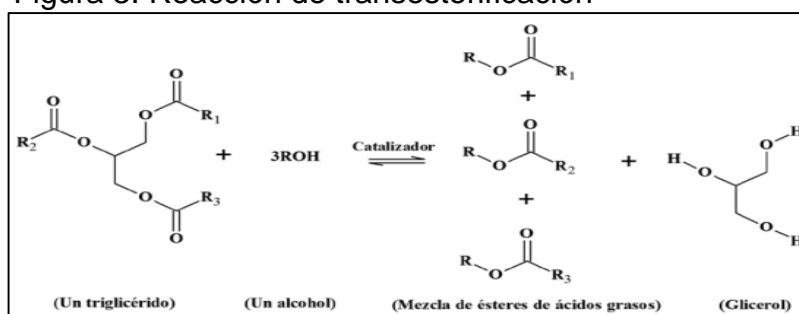
²⁰ CARDEÑO, F y GALLEGRO, L. Refinación de la fase glicerina del biodiésel de aceite de palma empleando ácidos minerales. Grupo procesos fisicoquímicos aplicados. *Información Tecnológica*. 22 de marzo de 2011, vol. 22, nro. 6, pp. 15-24. ISSN 0718-0764.

Tabla 6. (Continuación)

Propiedad	Unidades	Especificación	
		Mínimo	Máximo
Contenido de biocombustible	ml/ml	1,8	1,2
Color ASTM	Clasificación		3,0
Destilación	°C		
Punto inicial de ebullición	-		Reportar
Temp. 50% vol. Recobrado	-		Reportar
Temp. 95% vol. Recobrado	-		360
Punto final de ebullición	-		390
Gravedad API	° API		Reportar
Índice de cetano	N/A	45	
Número de cetano	N/A	43	
Punto de fluidez	°C		3
Punto de nube	°C		Reportar
Punto de inflamación	°C	52	
Temperatura obturación filtro frío	°C		Reportar
Viscosidad cinemática a 40°C	mm ² /s	1,9	5,0
Estabilidad térmica	%reflectancia	70% a 90 min.	
Estabilidad a la oxidación	g/100ml		25
Lubricidad a 60°C	Micrómetros		450

Fuente: ECOPEPETROL S.A. [sitio web]. Bogotá: ECOPEPETROL, Nuestros productos: Diesel corriente B2/B4. [Consulta: 5 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.aescolombia.com.co/Descargables/FichasTecnicas/Ecopetrol-Diesel-corriente-B2-B4-VSM-01.pdf>

Figura 3. Reacción de transesterificación



Fuente: CASTELLAR, Grey, et al. Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. [en línea]. 2014, mayo-junio, 12 (2). 90-104. [consultado 5 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>

Como se observa en la figura 3, las materias primas empleadas para la obtención son un aceite o grasa, un alcohol y un catalizador, con los que se logra convertir los glicéridos del aceite en ésteres metílicos (biodiésel o FAME), obteniéndose

como subproducto glicerol, es decir, el biodiésel se compone en menor proporción de triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, glicerina y metanol, y en mayor proporción (97,5% en masa) por ésteres metílicos de ácido graso (Anexo N).

En Colombia, las principales fuentes de obtención de biodiésel son aceites de palma, de ajonjolí, de algodón y de soja, siendo el primero el de mayor uso en el país, por tanto al provenir del aceite de palma, la mayoría de los ácidos grasos de los glicéridos son los ácidos oleico (36% – 44 %) y palmítico (39,3% - 47,5%)²¹. La tabla 7 enseña las características técnicas del biodiésel producido a partir del aceite de palma por la empresa Bio D S.A., así como el requisito nacional para su producción.

En esta sección, se presenta una revisión de las principales tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados. Para los propósitos de exposición, estas tecnologías fueron divididas con base en su principio de accionamiento, el cual a su vez es función del objetivo que se quiere alcanzar. De este modo, se tienen técnicas de contención, de confinamiento y de descontaminación²².

Tabla 7. Características técnicas del biodiésel a partir de Aceite de palma

Propiedad	Unidad	Requisito nacional	Especificación Bio D S.A.
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	860-900	860-900
Gravedad API a 60 ° F	°API	Reportar	Reportar
Humedad Karl Fischer	mg/Kg	500 máx.	*250 máx.
Número ácido	mgKOH/g	0,5 máx.	0,5 máx.
Punto de fluidez	°C	Reportar	Reportar
Monoglicéridos	% en masa	0,8 máx.	*0,40 máx.
Diglicéridos	% en masa	0,2 máx.	*0,10 máx.
Triglicéridos	% en masa	0,2 máx.	*0,08 máx.
Glicerina libre	% en masa	0,02 máx.	0,010 máx.
Glicerina total	% en masa	0,25 máx.	0,15 máx.
Contenido de metanol	% en masa	0,2 máx.	0,2 máx
Contenido de FAME	% en masa	96,5 máx.	96,5 máx.
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	1,9-6,0	1,9-6,0
Destilación	°C	360 máx	360 máx
Contaminación total	mg/Kg	24 máx.	*15 máx.
Índice de yodo	g de yodo/100g	120 máx.	120 máx.

²¹ RINCÓN, Sandra & MARTÍNEZ, Daniel. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. En: *Revista Palmas*. [En línea]. Bogotá: enero, 2009, vol. (30), No. (2), p. 11-24. [Consultado: 25 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1432>

²² ORTIZ BERNAD, Irene, *et al.* Informe de Vigilancia Tecnológica. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Elecé Industria Gráfica, 2007. M-5.839-2007. p. 21

Tabla 7. (Continuación)

Propiedad	Unidad	Requisito nacional	Especificación Bio D S.A.
Punto de nube	°C	Reportar	Reportar

Fuente: Bio D S.A. [Ficha técnica]. 2019.

*Especificaciones de cumplimiento voluntario de Bio D S.A.2.1.3 Tecnologías de remediación

- **Técnicas de contención:** Mediante barreras físicas se aísla el suelo contaminado, pero no se actúa sobre él.
- **Técnicas de confinamiento:** Se reduce la movilidad del contaminante en el suelo modificando las condiciones físicas y químicas bajo las que se encuentra el mismo.
- **Técnicas de descontaminación:** Dirigidas a disminuir la concentración del contaminante en el suelo²³. Se dividen en cuatro grupos:
 - Físico-químico: Son tratamientos que utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
 - Biológico: Son tratamientos que degradan contaminantes orgánicos o disminuyen la toxicidad de contaminantes inorgánicos mediante la actividad biológica natural de microorganismos.
 - Térmico: Son tratamientos en los que se suministra calor para destruir los contaminantes o la desorción del mismo.
 - Mixto: Son tratamientos que combina técnicas biológicas con fisicoquímicas.

“Es importante tener en cuenta que el término “tecnología de tratamiento” implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante, a través de acciones químicas, físicas o biológicas, de manera que reduzca la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado”²⁴. Los factores principales que influyen en la eficiencia de la remediación son las características del contaminante, del medio y de la interacción contaminante-medio.

En el cuadro 1, se presentan los tipos de tratamientos biológicos, con el fin de detallar el método de accionamiento de cada uno, y así identificar y enfatizar en el tipo de tratamiento correspondiente a la tecnología OSE II.

²³ Ibid., p. 22.

²⁴OBLASSER, A, et al. Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados [en línea]. [Consultado el 22/08/2019]. Disponible en : https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/06/Manual-de-Tecnolog%C3%ADas-de-Remediaci%C3%B3n-de-Sitios-Contaminados_baja.pdf

Cuadro 1. Principales técnicas de recuperación de suelos, mediante tratamientos biológicos

Tratamiento Biológico	Aplicación
Biodegradación asistida	In situ
Biotransformación de metales	In situ
Fitorrecuperación	In situ
Bioventing	In situ
Landfarming	Ex situ
Biopilas	Ex situ
Compostaje	Ex situ
Lodos biológicos	Ex situ

Fuente: ORTIZ BERNAD, Irene, *et al.* Informe de Vigilancia Tecnológica. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Elecé Industria Gráfica, 2007. M-5.839-2007. p. 24.

A continuación se realiza una pequeña descripción de los tipos de tratamiento biológicos mencionados en el cuadro 1.

En los tratamientos que se realizan in situ, encontramos los siguientes:

Biodegradación asistida: También conocida como bioaumentación, es un proceso en el cual los microorganismos de la zona o inoculados descomponen el contaminante orgánico a productos finales inocuos. Los contaminantes son biotransformados para que el microorganismo lo utilice en su crecimiento como fuente de carbono y energía²⁵.

Biotransformación de metales: Este proceso consiste en transformar los metales en sustancias menos tóxicas por medio de los microorganismos, ya que estos no pueden degradar ni destruir metales ni sustancias inorgánicas; por tanto ayudan a la inmovilización de metales en el suelo para un posterior tratamiento²⁶.

Fitorrecuperación: Consiste en utilizar especies vegetales que pueden sobrevivir en ambientes contaminados con metales y sustancias orgánicas, y estas a su vez extraigan, acumulen, inmovilicen o transformen los contaminantes presentes²⁷.

Bioventing: Este tratamiento consiste en inyectar aire u oxígeno, y de ser necesario, nutrientes que estimulen la actividad microbiana biodegradadora, para degradar los compuestos orgánicos del suelo de la zona no saturada²⁸.

Y aquellos tratamientos que se realizan ex situ, son:

²⁵ ORTIZ BERNAD, Irene. Op. cit., p. 40.

²⁶ Ibid., pp. 43-44.

²⁷ Ibid., p. 47.

²⁸ Ibid., p. 49.

Landfarming: Es un tratamiento de recuperación biológica que reduce los hidrocarburos del petróleo de peso mediano. Para esto el suelo se excava y se extiende en una capa de no más de 1,5 m de espesor, y se estimula la actividad microbiana mediante la aireación (arado del terreno) y la adición de nutrientes, minerales y agua²⁹.

Biopilas: Consiste en apilar el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana aerobia mediante la inyección de aire y la adición de nutrientes, minerales y agua. Estas pilas se recubren para promover el calentamiento por el sol, y a su vez evitar la escorrentía, evaporación y volatilización del contaminante³⁰.

Compostaje: Consiste en estimular la actividad bacteriana, tanto aerobia como anaerobia, bajo condiciones termofílicas, que permitan transformar las sustancias contaminantes en sustancias inocuas. Para esto los suelos que se encuentran contaminados, se mezclan con residuos animales y vegetales, como abono, estiércol y residuos de madera, proporcionando carbono y nitrógeno, y una porosidad óptima³¹.

Lodos biológicos: Es un tratamiento en el que se excava el suelo contaminado y se tamiza para retirar los elementos gruesos, luego se mezcla con agua y otros aditivos en un biorreactor controlado. El lodo resultante mantiene a los sólidos en suspensión y a los microorganismos biodegradadora en contacto con las sustancias contaminantes³².

Posteriormente se detallará a fondo la técnica de descontaminación biológica de Biorremediación asistida, ya que es este el foco de la evaluación.

2.1.3.1 Biorremediación asistida. La biorremediación asistida o bioaumentación es una de las tecnologías más aplicadas para la descontaminación de suelos impactados por hidrocarburo, ya que entre sus ventajas están la aceleración de la biodegradación, es aplicable sobre un amplio espectro de contaminantes biodegradables y optimiza las condiciones medioambientales. El costo de su implementación generalmente es elevado.

En este proceso, los contaminantes orgánicos son biotransformados porque generalmente los microorganismos pueden utilizarlos para su propio crecimiento como fuente de carbono y energía y, en el caso de que no sean capaces de crecer a partir de ellos, pueden seguir transformándolos si se les aporta un sustrato de crecimiento alternativo o cosustrato. Para el crecimiento de los microorganismos es

²⁹ Ibid., p. 50.

³⁰ Ibid., p. 50.

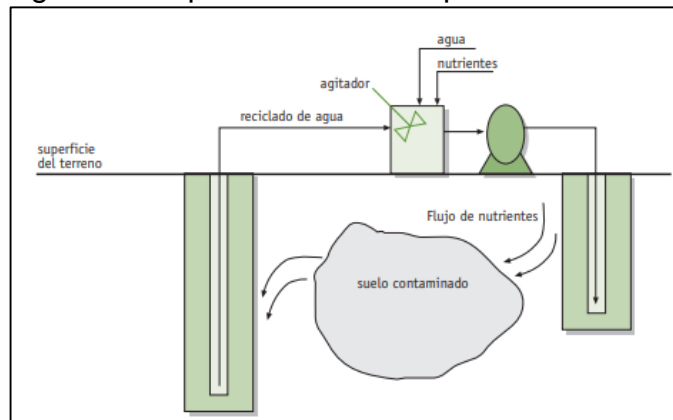
³¹ Ibid., p. 51.

³² Ibid., pp. 51-52.

necesaria la presencia de donadores y aceptores de electrones, una fuente de carbono y nutrientes (N, P, K, S, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu y elementos traza).³³

Este tratamiento requiere de la circulación de soluciones acuosas que contengan nutrientes y/u oxígeno a través del suelo contaminado para estimular la actividad de los microorganismos, este proceso se puede observar en la figura 4.

Figura 4. Esquema de biorrecuperación asistida



Fuente: ORTIZ BERNAD, Irene, *et al.* Informe de Vigilancia Tecnológica. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Elecé Industria Gráfica, 2007. M-5.839-2007. p. 42.

2.1.3.2 Biodegradación de diésel y biodiésel como contaminantes. A continuación se describen los procesos de biodegradación de las parafinas (compuesto en mayor proporción en el diésel B10) y la biodegradación de los ácidos grasos (compuestos presentes en el biodiésel).

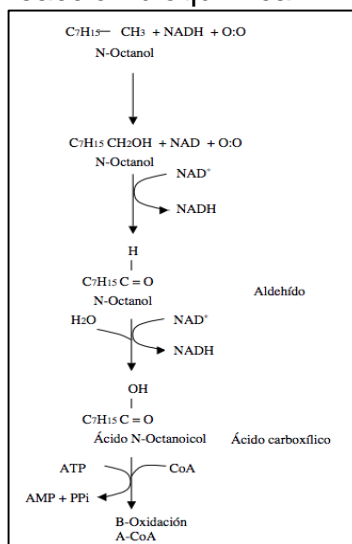
- *Biodegradación de parafinas:* Las parafinas son hidrocarburos alcanos (C_NH_{2N+2} ; N es el número de carbonos) y se pueden presentar diferentes tamaños de cadenas, teniendo una resistencia a la biodegradación a medida que su longitud aumenta. Los microorganismos que utilizan como fuente de energía a los hidrocarburos contienen enzimas que son dependientes del oxígeno y ayudan a la descomposición del contaminante, facilitando así el proceso de metabolización.

La biodegradación de estos compuestos, en presencia de oxígeno, usualmente ocurre de la siguiente manera: 1) se forma un alcohol primario, 2) se obtiene un aldehído y por último 3) un ácido carboxílico. Como se observa en la figura 5, la degradación de este último ocurre por Beta-oxidación, ruta por la cual se obtienen ácidos grasos con dos átomos de carbono en forma de

³³ Ibid., p. 40.

Acetil-CoA³⁴ gracias a la enzima acil-CoA, para que así finalmente mediante el ciclo de Krebs y la fosforilación oxidativa se desprenda dióxido de carbono y agua, respectivamente. Estas fases, se describen más adelante.

Figura 5. Ruta de degradación de los alcanos por reacción bioquímica

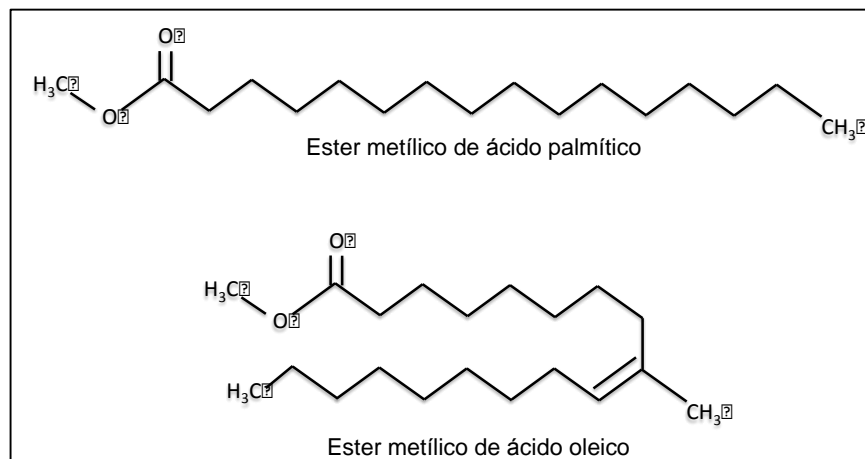


Fuente: LOZANO, Nelly. Biorremediación de ambientes contaminados con petróleo. [Figura]. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 2005. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/4326/6317>

- *Biodegradación de ésteres metílicos de ácido graso*: El biodiésel, también conocido como éster metílico de ácido graso, está compuesto mayormente por éster metílico bien sea de ácido palmítico o ácido oleico, las estructuras moleculares se presentan en la figura 6. Al igual que en la biodegradación de las parafinas, las enzimas acil-CoA ayudan en la descomposición de los ésteres metílicos en ácidos grasos con dos átomos de carbono (Acetil-CoA), para iniciar el proceso de obtención de energía por medio del Ciclo de Krebs y la fosforilación oxidativa.

³⁴ LOZANO, Nelly. Biorremediación de ambientes contaminados con petróleo. En: *Tecnogestión Una mirada al ambiente*. Pontificia Universidad Javeriana.: Septiembre, 2005, vol. (2), No. (1), p. 51-55. [Consultado el día 26 de septiembre de 2019]. Disponible en: [file:///Users/admin/Downloads/4326-Texto%20del%20art%C3%ADculo-18518-1-10-20130823%20\(1\).pdf](file:///Users/admin/Downloads/4326-Texto%20del%20art%C3%ADculo-18518-1-10-20130823%20(1).pdf)

Figura 6. Estructura molecular de éster metílico de ácido graso del biodiésel



Fuente: Elaboración propia

Los ácidos grasos presentes en la molécula de biodiésel son saturados (contienen enlaces sencillos entre los átomos de carbono) e insaturados (presentan dobles enlaces entre sus átomos de carbono): ácido palmítico y ácido oleico, respectivamente. La diferencia en el rompimiento de la cadena para llegar a moléculas de dos carbonos radica en que para los ácidos grasos insaturados es necesaria la presencia de una enzima auxiliar (enoil-CoA isomerasa) para solventar la complejidad de la ruptura del doble enlace.

Como se mencionó, la ruta metabólica completa para la descomposición tanto de parafinas como de ésteres metílicos de ácido graso en CO₂ y H₂O incluye las fases de Beta-oxidación, ciclo de Krebs y finalmente la fosforilación oxidativa, y estas tres fases ocurren en la mitocondria de las células de los microorganismos presentes en la zona; por tanto, estas fases se describen a continuación.

En primera instancia, la *Beta-oxidación* es una ruta catabólica en la que de la cadena de ácido graso o carboxílico se van desprendiendo progresivamente dos átomos de carbono que salen en forma de Acetil-CoA, debido a cuatro reacciones que suceden en esta fase (Deshidrogenación, hidratación, oxidación y tiolisis) y a la acción de enzimas que actúan como catalizadores; esto hasta que la cadena larga quede con dos átomos de carbono, es decir, hasta obtener un acetato³⁵. Después, estas moléculas de Acetil-CoA entran al *ciclo de Krebs*, en el cual se descomponen moléculas orgánicas complejas para la obtención de energía; en este proceso se requieren moléculas de oxígeno para oxidar el Acetil-CoA ya que

³⁵ UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO. Bioquímica. En: *Catabolismo de los ácidos grasos*. 2016. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-20. Disponible en: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-alfonso-x-el-sabio/bioquimica/apuntes/tema-7-catabolismo-de-los-acidos-grasos/1433803/view>

es un proceso respiratorio, y por tanto, hay eliminación de dióxido de carbono resultante de la degradación de los tricarboxilos (ácido graso con tres grupos funcionales carboxilos)³⁶. Por último, la *fosforilación oxidativa* es la culminación de la respiración celular, en donde los electrones se transportan de una molécula a otra y la energía liberada se utiliza para formar un gradiente electroquímico, y así luego ser sintetizada en moléculas energéticas (ATP o Adenosín trifosfato). El oxígeno se encuentra al final de la cadena de transporte de electrones para formar agua.³⁷ En la figura 7, se presenta el proceso anteriormente descrito.

Es así como las moléculas de ésteres metílicos de ácidos grasos y parafinas, al descomponerse por medio de una ruta metabólica, generan como productos dióxido de carbono y agua, además de energía para los procesos celulares de los microorganismos.

2.1.3.3 Factores que condicionan la biorremediación. La degradación de un contaminante en un suelo está determinada por varios factores: Temperatura, pH, humedad, nutrientes, microorganismos, estructura del suelo y contaminante, aireación y aceptor de electrones.

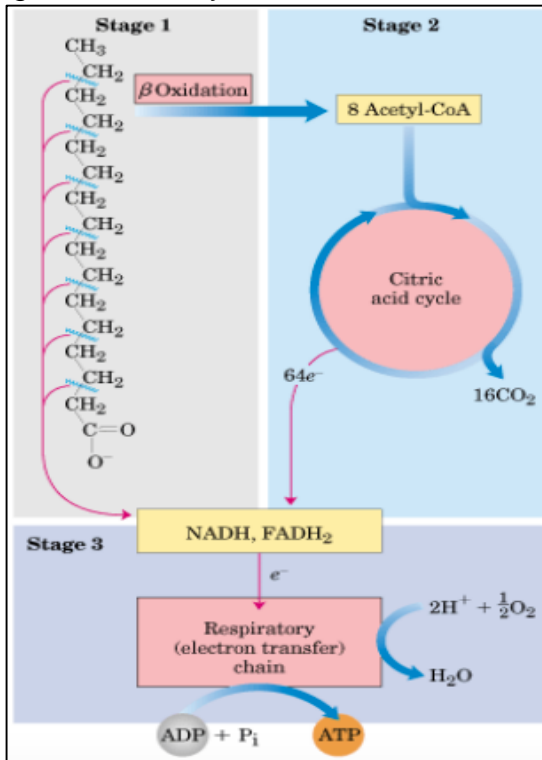
- **Temperatura:** Este es un factor de gran importancia ya que está directamente relacionado con la actividad metabólica de los microorganismos. La mayoría de estos, crecen de manera óptima entre los 20 °C y 30 °C (condiciones mesófilas). Si no se controla la temperatura, puede llegar a desnaturalizarse o inhibirse la acción enzimática.
- **Contenido de humedad:** El contenido de humedad es importante ya que el agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como vehículo para transportar los nutrientes desde el medio hacia el interior de la célula, por ende, requiere de unas condiciones mínimas. Sin embargo, la humedad debe controlarse ya que un exceso puede llegar a inhibir el crecimiento de los microorganismos al reducir la concentración de oxígeno en el suelo³⁸.

³⁶ CONTRERAS, Ramón. ¿Qué es y por qué es importante el ciclo de Krebs?. 2014. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-20. Disponible en: <https://biologia.laguia2000.com/bioquimica/que-es-y-por-que-es-importante-el-ciclo-de-krebs>

³⁷ MARCHÁN, Joaquín. Cadena respiratoria y fosforilación oxidativa. 2019. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-21. Disponible en: <https://www.studocu.com/en/document/universidad-nacional-del-sur/quimica-biologica/lecture-notes/7-cadena-respiratoria-y-fosforilacion-oxidativa/2813565/view>

³⁸ PONCE CONTRERAS, Daniela. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad del Bio-Bio, 2014. [Consultado el 25/08/2019]. Disponible en: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/135/3/Ponce%20Contreras%2C%20Daniela.pdf>

Figura 7. Esquema general de la degradación de ácidos grasos a CO₂ y H₂O



Fuente: VITORIA, Victor. La oxidación de los ácidos grasos. [Diapositivas]. España: Marianistas – Compañía de María. 2019. 18 diapositivas. Disponible en: <https://es.slideshare.net/profesorjano/beta-oxidacion-ac-grasos>

- **Nutrientes:** Son sustancias químicas necesarias para la actividad microbiana y metabólica de los microorganismos. Existen dos grupos de nutrientes: macro y micronutrientes. Dentro de los macronutrientes se encuentran el carbono, nitrógeno, potasio y fósforo. Los micronutrientes están constituidos por un conjunto variado de elementos: hierro, cobre, zinc, azufre, cobalto, magnesio, manganeso y calcio³⁹. Normalmente, este último grupo no se incorpora de manera externa, puesto que el mismo suelo ya los provee en cantidades suficientes.
- **Microorganismos:** La densidad de microorganismos presentes en el suelo es un factor primordial en el proceso de biorremediación, además, se precisa idealmente conocer la cinética de crecimiento del microorganismo y su nivel de rendimiento metabólico en la fase exponencial.

³⁹ GÓMEZ ROMERO, Sara, *et al.* Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. 9 de enero-junio de 2008. vol. 6, nro. 9, pp. 76-84. ISSN 1794-2470.

- **Estructura del suelo:** La textura y granulometría puede interferir en la entrada efectiva de aire, agua, nutrientes y en la movilidad del contaminante. Un suelo con baja permeabilidad impedirá el movimiento e intercambio de nutrientes, agua y oxígeno durante el proceso de biodegradación reduciendo así la efectividad de este.
- **Aireación:** La aireación del suelo favorece la degradación de los hidrocarburos ya que facilita la migración de la fase volátil de los contaminantes e incrementa la oxigenación del suelo estimulando así la actividad bacteriana.
- **Aceptor de electrones:** El oxígeno generalmente es el aceptor de electrones en los procesos de remediación biológicos. Para obtener la energía necesaria para su crecimiento, los microorganismos oxidan compuestos orgánicos e inorgánicos⁴⁰.
- **Estructura del contaminante:** La estructura molecular del contaminante es de suma importancia ya que está directamente relacionada con la capacidad de que pueda ser degradado. En cuanto a la biodegradabilidad de un hidrocarburo, los factores más influyentes son la existencia de ramificaciones, baja solubilidad en agua, carga atómica y la halogenación, sin embargo e independientemente de la naturaleza del contaminante, su estructura química determina la solubilidad, polaridad, volatilidad y capacidad de reaccionar con otras sustancias⁴¹.

El grado de influencia de cada uno de estos factores es diferente y su importancia viene determinada por las condiciones de la relación suelo-contaminante, por lo que se precisa analizar y definir cuáles son aquellos que tendrán un mayor grado de afectación en el proceso de biodegradación.

2.1.4 Métodos de Laboratorio. A continuación se describen los métodos de análisis de los parámetros de mayor relevancia para el desarrollo experimental: Bouyoucos para la textura, y SM 5520-E para grasas y aceites (parámetro sobre el cual se medirá la efectividad del tratamiento). El análisis de textura se realiza en el laboratorio INGELAB S.A.S y se analiza por medio del método Bouyoucos. Por otro lado, el análisis de Grasas y aceites está a cargo de HIDROLAB, mediante el método SM 5520-E.

2.1.4.1 Método de Bouyoucos (Método del Hidrómetro). Para comenzar, se describe el principio del método, procedimiento y cálculos para cuantificar el contenido de arcilla, limo y arena presente en el suelo, y así llegar a obtener una

⁴⁰ TORRES DELGADO, Katherine y ZULUAGA, Tatiana. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.[En línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009. [Consultado el 25/08/2019]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/815/1/32242005_2009.pdf

⁴¹ Ibid., p.41.

clasificación textural con el diagrama de clases texturales. Esta información es tomada del Instructivo para la determinación de la textura del suelo por el Método Bouyoucos, realizado por el INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC), en el año 2018⁴².

- **Principio del método:** Para determinar la textura, se busca establecer las proporciones de arena, limo y arcilla presente en la fracción fina del suelo. Esto se logra haciendo pasar la muestra de suelo por una malla de abertura igual a 2 mm, conocida comercialmente como Tamiz No. 10. Para esta distribución de partículas, se debe neutralizar la acción de los agentes cementantes del suelo: materia orgánica, sales de hierro y aluminio o carbonato de calcio.

Este método actúa bajo el principio de la Ley de Stokes, en la que se establece que dependiendo del tamaño y densidad de las partículas del suelo, su velocidad de sedimentación será diferente en determinado medio. Las partículas caen por una columna de un líquido viscoso (Agua) para luego determinar la cantidad de sólidos en suspensión a través de un hidrómetro, el cual funciona por el principio de Arquímedes: a menor densidad de la solución, mayor hundimiento tendrá el instrumento. Es necesario controlar los parámetros que intervienen en la velocidad de sedimentación, por ejemplo, la temperatura a la cual se realiza el análisis.

El método Bouyoucos funciona así: Una vez transcurren 40 segundos, las partículas con diámetro mayor a 50 micras (arena) se han sedimentado y en suspensión ha quedado una mezcla de limo y arcilla. Después de dos horas, las partículas con diámetro entre 2 y 50 micras (limo) se sedimentan, teniendo finalmente en suspensión únicamente arcilla. Las lecturas deben realizarse con un solo hidrómetro y a una misma escala.

- **Procedimiento:**
 - a. Homogeneizar la muestra de suelo seco al aire y tamizado con malla de 2 mm, pesar 50 g y colocar en un frasco de 250 ml. (Pesar 10 g del mismo suelo para corrección de humedad)
 - b. Adicionar agua potable (ya que es un agua limpia, sin sedimentos que pueda contaminar la muestra) hasta completar 2/3 del volumen del frasco.
 - c. Agregar 10 ml de solución de agente dispersante (hexametáfosfato de sodio, $(\text{NaPO}_3)_6$, y carbonato de sodio, (Na_2CO_3)).
 - d. Colocar el frasco en agitación durante dos horas, en posición horizontal a 180 rpm. Al terminar dejar enfriar.

⁴² INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Instructivo Determinación de la textura del suelo – Hidrómetro de Bouyoucos – Densimétrico – Método IGAC – Adaptado a los suelos colombianos. Grupo interno de trabajo laboratorio nacional de suelos. 2018. Cód: I40600-25/18.V8.

- e. Preparar un blanco para definir la corrección por dispersante. En una probeta de 1.000 ml agregar 10 ml de agente dispersante y llevar a volumen de 1.000 ml con agua potable.
 - f. Transvasar la muestra al cilindro aforado, y llevar a volumen de 1000 ml con agua potable.
 - g. Agitar vigorosamente con el agitador manual en forma vertical durante 30 segundos y retirar el agitador ligeramente inclinado para devolver el material adherido a él.
 - h. Sumergir inmediata y cuidadosamente el hidrómetro en el cilindro, registrar el tiempo de inicio, y transcurridos 40 segundos, tomar la lectura en la parte superior del menisco formado en el hidrómetro.
 - i. Retirar el hidrómetro y lavar con agua potable.
 - j. Dejar la suspensión en reposo durante dos horas.
 - k. Pocos segundos antes de transcurridas las dos horas, introduzca el hidrómetro en la suspensión y al cumplir exactamente las dos horas, tomar la lectura en la parte superior del menisco formado en el hidrómetro.
 - l. Retirar y lavar el hidrómetro.
 - m. Sumergir el termómetro en la solución y registrar la temperatura.
 - n. Repetir el procedimiento con el blanco de proceso y las muestras de la tanda.
 - o. Realizar los cálculos para determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla para cada una de las muestras de la tanda.
 - p. Promediar los valores y calcular la desviación estándar.
- **Cálculos:** Para la determinación de los porcentajes de arena, arcilla y limo, se aplica: corrección por dispersante (blanco de proceso), corrección por calibración del hidrómetro utilizado, corrección por temperatura y corrección por humedad de la muestra a peso constante 105 °C.

La ecuación 1, plantea las expresiones para el cálculo de los porcentajes de las fracciones del suelo.

Ecuación 1. Expresiones para calcular porcentajes de Arena, Arcilla y Limo.

$$\%Arena_{(2 \text{ a } 0,05 \text{ mm})} = 100 - \frac{Lectura\ corregida_{40^{\circ}C} \left(\frac{g}{L}\right) * V(L) * (100 + pW)}{Peso\ suelo\ (g)}$$

$$\%Arcilla_{(\leq 0,002 \text{ mm})} = \frac{Lectura\ corregida_{a\ las\ 2\ horas} \left(\frac{g}{L}\right) * V(L) * (100 + pW)}{Peso\ suelo\ (g)}$$

$$\%Limo_{(0,05 \text{ a } 0,002 \text{ mm})} = 100 - (\%Arena + \%Arcilla)$$

Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Instructivo Determinación de la textura del suelo – Hidrómetro de Bauyoucos – Densimétrico – Método IGAC – Adaptado a los suelos colombianos. Grupo interno de trabajo laboratorio nacional de suelos. 2018. Cód: I40600-25/18.V8.

Donde,

La lectura corregida es igual a: la lectura real en el tiempo indicado + corrección por calibración del hidrómetro – corrección por dispersante + corrección por temperatura.

La corrección por dispersante corresponde a: lectura real blanco con dispersante + corrección por calibración del hidrómetro + corrección por temperatura.

La corrección por temperatura y corrección de calibración se realiza de acuerdo al manual de lectura del hidrómetro utilizado.

El pW es el factor de corrección por humedad de la muestra a peso constante $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, expresada en porcentaje (%). Y por último, V , es el volumen del cilindro empleado.

2.1.4.2 Método SM 5520-E. En la determinación de grasas y aceites, no se realiza la medición de una cantidad absoluta de una sustancia específica, sino que los grupos de sustancias que poseen características similares se detectan cuantitativamente en función de su solubilidad en un disolvente orgánico utilizado en la extracción. El método estándar SM 5520E es una modificación del método Soxhlet y es apropiado para lodos y materiales similares; este método utiliza como agente extractivo una solución compuesta por n-hexano (80%) y metil tert-butil éter (20%) o MTBE (por sus siglas en inglés). El n-hexano se caracteriza por emplearse para la extracción de aceites vegetales y el MTBE es usado como disolvente de sustancias orgánicas.

A continuación se detalla el principio de funcionamiento de la extracción Soxhlet, al igual que el procedimiento para la determinación de grasas y aceites propuesto en el método SM 5520E, finalmente se presentan los cálculos para la determinación del contaminante.

- **Principio del método:** Para determinar la cantidad de grasas y aceites de una muestra, se realiza una extracción conocida como sólido-líquido por medio de la extracción Soxhlet, ya que es un método muy utilizado en la separación de analitos (especie química cuyo contenido se quiere conocer) de muestras sólidas.

En la extracción Soxhlet se introduce la muestra sólida finamente pulverizada en un material poroso situada en la cámara del extractor (ver figura 8); en el matraz se agrega el disolvente que va a extraer el contaminante de interés (grasas y aceites), y este es calentado gracias a la estufa que puede alcanzar la temperatura de ebullición del disolvente empleado.

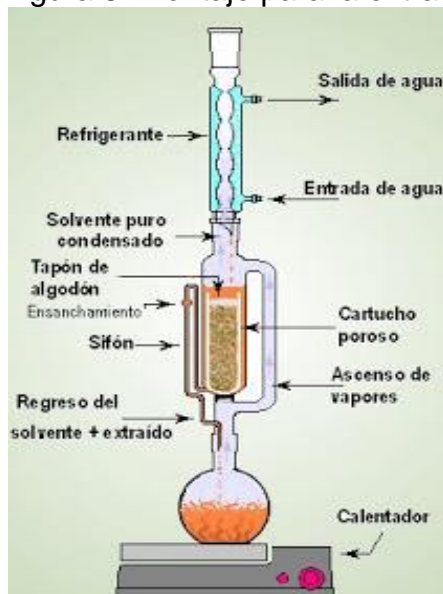
Una vez se vaporiza el solvente, este llega al tubo refrigerante, donde se condensan los vapores, y cae gota a gota sobre la muestra contenida en el material poroso, extrayendo los analitos solubles. Cuando el nivel del disolvente condensado en la cámara del extractor alcanza la parte superior del sifón lateral, el disolvente con los analitos disueltos desciende por el sifón hasta llegar al matraz de ebullición. Este proceso se repite hasta que los analitos se concentran en el disolvente.⁴³

Por último, se retira el matraz y se vaporiza el disolvente con el fin de obtener el analito puro, y así realizar una cuantificación de este en la muestra inicial.

- **Procedimiento⁴⁴:**

- a. Acidificar la muestra una vez llegue al laboratorio, con 1 ml de ácido clorhídrico (HCl) por cada 80 g de muestra.

Figura 8. Montaje para la extracción Soxhlet



Fuente: UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE. Práctica 5: Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet. [Figura]. Sevilla: Ciencias Ambientales, 2004. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf

⁴³ UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE. Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet. Técnicas avanzadas en Química Práctica 5. 2005. Ciencias Ambientales. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf

⁴⁴ STANDARD METHODS. Standard methods for the examination of water and wastewater. 5520 OIL AND GREASE (2017). 2018. Disponible en: <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.107>

- b. En un vaso de precipitado de 150 ml, pesar $20 \pm 0,5$ g de muestra de lodo húmedo, para el cual se conoce el contenido de sólidos secos.
 - c. Acidificar la muestra a pH 2 o inferior, con 0,3 ml de HCl.
 - d. Añadir 25 g de Sulfato de magnesio monohidratado ($MgSO_4 \cdot H_2O$).
 - e. Agitar hasta obtener una pasta suave y extender por los lados del vaso de precipitado para facilitar su posterior extracción.
 - f. Dejar reposar de 15 a 30 minutos, hasta que se solidifique.
 - g. Eliminar sólidos y moler en un mortero de porcelana y posteriormente agregar el polvo a un dedal de extracción de papel.
 - h. Limpiar el vaso de precipitado y el mortero con trozos de papel filtro humedecido con disolvente y agregarlos al dedal.
 - i. Rellenar el dedal con lana de vidrio.
 - j. Tarar el matraz de extracción y añadir 100 ml de disolvente, que consta de 80% de n-hexano y 20% de éter metil tert-butílico (MTBE), proporción volumen/volumen.
 - k. Extraer en un aparato Soxhlet a una velocidad de 20 ciclos/h, durante 4 horas.
 - l. Destile el disolvente del matraz en un baño de agua a $85 \text{ }^\circ\text{C}$, colocando el matraz de destilación con un adaptador de destilación equipado con una punta de goteo, y recoja el disolvente en un receptor enfriado por baño de hielo.
 - m. Retire el matraz del baño de agua, cuando se detenga la condensación visible del disolvente.
 - n. Enfríe el matraz en un desecador durante al menos 30 minutos y luego pese.
 - o. Registre el peso y proceda a calcular el contenido de grasas y aceites.
- **Cálculos:** A continuación se presenta la expresión (Ecuación 2) para calcular el porcentaje de grasas y aceites (G&A) de sólidos secos.

Ecuación 2. Cálculo del contenido de grasas y aceites en peso seco

$$\% \text{G\&A}_{\text{peso seco}} = \frac{W_{\text{matraz}} \times 100}{W_{\text{sólidos húmedos}} * X_{\text{seco}}}$$

Fuente: STANDARD METHODS. Standard methods for the examination of water and wastewater. 5520 OIL AND GREASE (2017). 2018. Disponible en: <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.107>

Donde:

$\%G\&A_{\text{peso seco}}$: porcentaje de grasas y aceites en peso seco

W_{Matraz} : aumento del peso del matraz en gramos

$W_{\text{Sólidos húmedos}}$: peso de los sólidos húmedos en gramos

X_{Seco} : fracción de sólidos secos

2.2 MARCO LEGAL

En la *Constitución Nacional de 1991* se presentan alrededor de 17 artículos que se relacionan con la protección, conservación, control y mejoramiento de los recursos naturales; en 3 de ellos, art° 360, 361 y 366 se enfatiza en el recurso suelo⁴⁵.

En el Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables*, se presentan artículos relacionados con el medioambiente. Relacionados con el suelo se encuentran los siguientes⁴⁶:

- Artículo 8°: Se consideran los principales factores relacionados con el deterioro del ambiente: degradación, erosión y revenimiento del suelo, así como alteraciones de la topografía.
- Artículos 182° a 186°: Concernientes a la conservación y uso del suelo.
- Artículos 324° a 326°: De los distritos de conservación de suelos; están directamente relacionados con el manejo especial orientado a la recuperación de suelos alterados o degradados o la prevención de fenómenos que causen alteración o degradación en áreas especialmente vulnerables por sus condiciones físicas o climáticas o por la clase de utilidad que en ellas se desarrolla.

En el *Decreto 4741 de 2005* por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, se encuentran algunos artículos en los que se especifican las obligaciones del generador, transportador y receptor en cuanto al sector de hidrocarburos se refiere, siendo estos los artículos 10°(numeral h), 16°(numeral e) y 17°(numeral g), respectivamente⁴⁷.

Finalmente, en el Decreto 321 de 1999, por el cual se adopta el *Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas*, se establece el protocolo para manejar situaciones en las que se contaminen

⁴⁵SUAREZ BELTRAN, Roland. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. [En línea]. Universidad libre, Instituto de Posgrados Ingeniería, Bogotá D.C, 2013. [Consultado el 27/10/19]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf?sequence=1>

⁴⁶COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 2911 (18 de diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C: El Ministerio.

⁴⁷COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 4741 (30 de diciembre, 2005). Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá: El Ministerio.

recursos naturales con este tipo de contaminantes⁴⁸. Sin embargo, los decretos y artículos anteriormente mencionados, en su mayoría, no fijan los valores o límites permisibles de los contaminantes, razón por la cual Colombia implementa normatividad internacional en la que sí se establecen y especifican estos. En el siguiente cuadro (2) se mencionan las de mayor relevancia:

Cuadro 2. Normatividad internacional ambiental acogida por Colombia

Normas internacionales ambientales
Protocolo de Louisiana 29 B Convenio internacional sobre responsabilidad por daños causados por la contaminación de aguas del mar con hidrocarburos (1969) y protocolo "CLC 69/76 (1976)
Convenio para la protección del patrimonio mundial, cultural y natural. París, 1972.
Convenio Internacional para prevenir la contaminación por buques, 1973. Protocolo relativo a la contaminación del mar (MARPOL) por buques 1978.
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).
Acuerdo sobre la cooperación regional para el combate de la contaminación del Pacífico Sudeste por hidrocarburos y otras sustancias nocivas, en caso de emergencia. Lima, 1981.
Convenio de las Naciones Unidas sobre el derecho del Mar. Jamaica, 1982
Protocolo de cooperación para combatir derrames de hidrocarburos en la región del Gran Caribe. Cartagena, 1983.
Protocolo complementario del 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 relativo a las zonas protegidas del Convenio para la protección y desarrollo del medio marino de la región del Gran Caribe. 1990.
Convenio relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas - RAMSAR (acogido por Colombia en 1997).

Fuente: TRUJILLO, María Alejandra y RAMÍREZ, Juan Fernando. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. En: *Revista de investigación agraria y ambiental*. [en línea]. Cali: 2012, vol. (3), nro. (2), p. 37-62. [Consultado 28 octubre 2019]. Disponible en: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/952/946>

Como se ha mencionado, Colombia se ha acogido a normatividad internacional ambiental con el fin de regular y proteger los recursos naturales; específicamente en cuanto al manejo y disposición final de residuos ocasionados por las

⁴⁸COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 321 (17 de febrero, 1999). Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas. Bogotá: El Ministerio.

actividades industriales del petróleo, el reglamento está basado en la norma estadounidense Louisiana 29B que se describe a continuación, ya que esta está directamente relacionada con el recurso suelo. A continuación se detalla la misma.

2.2.1 Norma Louisiana 29B. Como se menciona en la *Resolución No. 1001 del 25 de Mayo de 2010*, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial declara que la disposición final de los residuos de actividades petroleras se puede hacer siempre y cuando la mezcla residuo/suelo cumpla con los parámetros estipulados en la Norma Louisiana 29B, en la cual se establecen los límites permisibles de diferentes parámetros, y se especifican en la tabla 8.

Tabla 8. Límites permisibles en la Norma Louisiana 29B⁴⁹

Parámetro	Valor
Arsénico	10 ppm
Bario	20.000 ppm
Cadmio	10 ppm
Cromo⁺⁶	500 ppm
Plomo	500 ppm
Mercurio	10 ppm
Selenio	10 ppm
Plata	200 ppm
Zinc	50 ppm
Hidrocarburos totales del petróleo (TPH)	10.000 ppm
Grasas y Aceites	< 1% peso en seco
Conductividad Eléctrica	< 4 µmhos/cm
Relación Absorción de Sodio (RAS)	< 12
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PIS)	<15 %
pH	6 a 9
Contenido de Humedad	< 50% en peso

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1001. (25, mayo, 2010). Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio.

⁴⁹ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1001. (25, mayo, 2010). Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio.

3. ESPECIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO PARA LA EVALUACIÓN

El siguiente capítulo indica la metodología implementada para seleccionar la clase textural del suelo a trabajar durante la fase experimental. Aquí, inicialmente se describen los medios de transporte por los que se distribuye diésel en Colombia, cifras recientes de incidentes con derrame del combustible, tipos de suelo presentes en las zonas afectadas y el criterio para la selección del tipo de clase textural. Finalmente, se hace una caracterización físico-química del suelo seleccionado.

3.1 DISTRIBUCIÓN DE COMBUSTIBLE

Según el Reporte Integrado de Gestión Sostenible entregado por Ecopetrol, en el año 2018 se cargó a las refinerías (de Cartagena y Barrancabermeja) 372,9 kbdc y se vendieron 99.768 bpd de Diésel por parte de Ecopetrol, es decir, aproximadamente un 26,8% de la carga a las refinerías se destina para la producción de diésel.⁵⁰

Estos combustibles líquidos derivados del petróleo, entre ellos el diésel, se transportan por diferentes medios: terrestre, poliductos, marítimo, fluvial, férreo y aéreo. En Colombia, los medios de transporte más utilizados son el terrestre y los poliductos. El transporte por vía terrestre solo puede ser prestado por vehículos que tengan carrocería tipo tanque; este es un servicio que prestan diferentes transportadoras a nivel nacional. Los poliductos, son tuberías de acero por las que circulan los combustibles, estos pueden contener de 1 a 6 productos diferentes y el transporte se realiza por paquetes sucesivos denominados Baches. En Colombia, este medio de transporte está liderado por CENIT, quien está a cargo del 100% del transporte por medio de ductos de Ecopetrol S.A.

Gracias a reportes de Ecopetrol S.A., se conoce que en el año 2018 se transportaron por poliductos 273 kbpdc⁵¹, correspondientes a un 24,6% del volumen que se transporta por ductos. El porcentaje restante corresponde al volumen transportado por oleoductos.

3.1.1 Sistemas de poliductos. En el mapa de la infraestructura petrolera de Ecopetrol (Anexo A), se aprecian las líneas de distribución de oleoductos, poliductos, y propanoductos en Colombia. Con base a este y a información presentada por CENIT, en la tabla 9 se presentan aquellos sistemas por los que se transporta diésel a nivel nacional.

⁵⁰ ECOPETROL. Reporte integrado de Gestión sostenible 2018. Op. Cit., p. 12-14.

⁵¹ Ibid., p. 146.

Tabla 9. Sistemas de poliductos donde transita Diésel

Sistema	Estación Inicial	Estación Final	Diámetro Predominante (in)	Productos Asociados
ZONA NORTE				
Pozos – Ayacucho	Pozos	Ayacucho	14	ACEM, NATI, GMR, B2EIMPORTADO
Ayacucho – Galán	Ayacucho	Galán	14	ACEM, NATI, GMR, B2EIMPORTADO
Cartagena – Barranquilla	Cartagena	Baranoa	12	B4, GMR, GPR, KERO, JET A1
ZONA ESTE				
Galán – Bucaramanga	Galán	Bucaramanga	4 – 6 – 12	VOIL, GMR, GPR, B2, GLP
ZONA CENTRAL				
Galán - Sebastopol	Galán	Sebastopol	12 – 16	KERO, VOIL, GMR, GPR, B2, B2E, NAFTA
Sebastopol – Salgar	Sebastopol	Salgar	12	KERO, VOIL, GMR, GPR, B2, B2E, JET A1
Sebastopol – Medellín	Sebastopol	Medellín	10 – 12 – 16	KERO, VOIL, GMR, GPR, B2, B2E, JET A1
ZONA OESTE				
Medellín – Cartago	Medellín	Cartago	10	KERO, VOIL, GMR, GPR, B2, JET A1
Cartago – Yumbo	Cartago	Yumbo	10	KERO, VOIL, JET A1, GMR, GPR, B2
Salgar – Cartago	Salgar	Cartago	6 – 8	KERO, VOIL, GMR, GPR, B2, GLP

Fuente: CENIT TRANSPORTE Y LOGÍSTICA DE HIDROCARBUROS. [sitio web]. Bogotá: Cenit, Descripción de la red. [Consulta: 12 abril 2019]. Disponible en: <https://cenit-transporte.com/poliductos/>

Tabla 9. (Continuación)

Sistema	Estación Inicial	Estación Final	Diámetro Predominante (in)	Productos Asociados
ZONA OESTE				
Cartago – Yumbo	Cartago	Yumbo	6 – 8 – 10	VOIL, GMR, B2, GLP
Yumbo – Buenaventura	Yumbo	Buenaventura	6 – 12 – 8	B2, GMR
ZONA SUR				
Salgar – Gualanday	Salgar	Gualanday	12	GMR, GPR, B2
Gualanday – Neiva	Gualanday	Neiva	6 – 8	GMR, GPR, B2
ZONA BOGOTÁ				
Salgar – Mansilla	Salgar	Mansilla	10	JET A1, GMR, GPR, B2, B2E, VOIL
Salgar – La Dorada	Salgar	La Dorada	6	GMR, B2
Mansilla – Puente Aranda	Mansilla	Puente Aranda	10	JET A1, GMR, GPR, B2

Fuente: CENIT TRANSPORTE Y LOGÍSTICA DE HIDROCARBUROS S.A.S. [sitio web]. Bogotá: Cenit, Descripción de la red. [Consulta: 12 abril 2019]. Disponible en: <https://cenit-transporte.com/poliductos/>

3.1.2 Incidentes con pérdidas de contención. Los incidentes con pérdidas de contención presentados en la infraestructura que transporta combustibles, generalmente son causados por el apoderamiento ilícito mediante la conexión de válvulas en poliductos y atentados por parte de grupos al margen de la ley, generando así impactos económicos, sociales y ambientales.

De estos, la modalidad más utilizada es la conexión mediante válvulas y como se observa en la Tabla 10 los casos son cada vez más frecuentes, presentándose en el año 2018 un aumento del 18 % frente al 2017⁵².

En el año 2018, las pérdidas por apoderamiento de refinados fueron de 21 barriles promedio día⁵³. Para este mismo año, se presentaron 107 atentados contra la infraestructura de Ecopetrol (ver tabla 11)⁵⁴; de estos, 89 se presentaron en el

⁵² Ibid., p. 147.

⁵³ Ibid., p. 147.

⁵⁴ Ibid., p. 148.

Oleoducto Caño Limón Coveñas (OCC), 16 contra el Oleoducto Transandino (OTA) y 2 en departamento de Casanare contra una línea de flujo y un pozo.

Tabla 10. Número de válvulas ilícitas

Año	2015	2016	2017	2018
Atentados	900	623	933	1108

Fuente: ECOPETROL. Reporte integrado de Gestión sostenible 2018. En: Comercial y Mercadeo. [en Línea]. p. 147. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/Asamblea2019/reporte-integrado-gestion-sostenible-2018.pdf>

Tabla 11. Número de atentados en los últimos cuatro años

Año	2015	2016	2017	2018
Atentados	80	50	63	107

Fuente: ECOPETROL. Reporte integrado de Gestión sostenible 2018. En: Comercial y Mercadeo. [en Línea]. p. 148. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/Asamblea2019/reporte-integrado-gestion-sostenible-2018.pdf>

Nota: La información corresponde a los atentados relacionados con toda la infraestructura de Ecopetrol (Fuente: Gerencia de Seguridad Física)

Según lo reportado por CENIT, entre el año 2018 y Marzo de 2019 se presentaron 13 incidentes en poliductos que transportaban Diésel, en la tabla 12 se detallan los puntos afectados. A partir de estos, se logra identificar aquel con mayor volumen de barriles derramados: Sistema Pozos Colorados – Ayacucho – Galán.

3.1.2.1 Localización del Sistema Pozos Colorados – Ayacucho – Galán. Con ayuda de un programa informático que permite visualizar múltiple cartografía con base en fotografías satelitales (Google Earth), se identificaron las coordenadas geográficas angulares de los puntos 8 y 9 reportados por CENIT (ver tabla 12).

Inicialmente, en el mapa de la infraestructura petrolera de Colombia se localiza el Sistema Pozos Colorados – Ayacucho – Galán (el cual inicia en el departamento del Magdalena y finaliza en Santander, atravesando los departamentos del Cesar y Norte de Santander), para luego ubicarlo en Google Earth, como se aprecia en la figura 9. Luego, gracias a la ubicación de los incidentes presentada por Cenit (dada como la distancia en Kilómetros a lo largo del poliducto en la que se presentó el derrame), se registran las coordenadas geográficas angulares de los puntos 8 y 9 (tabla 13).

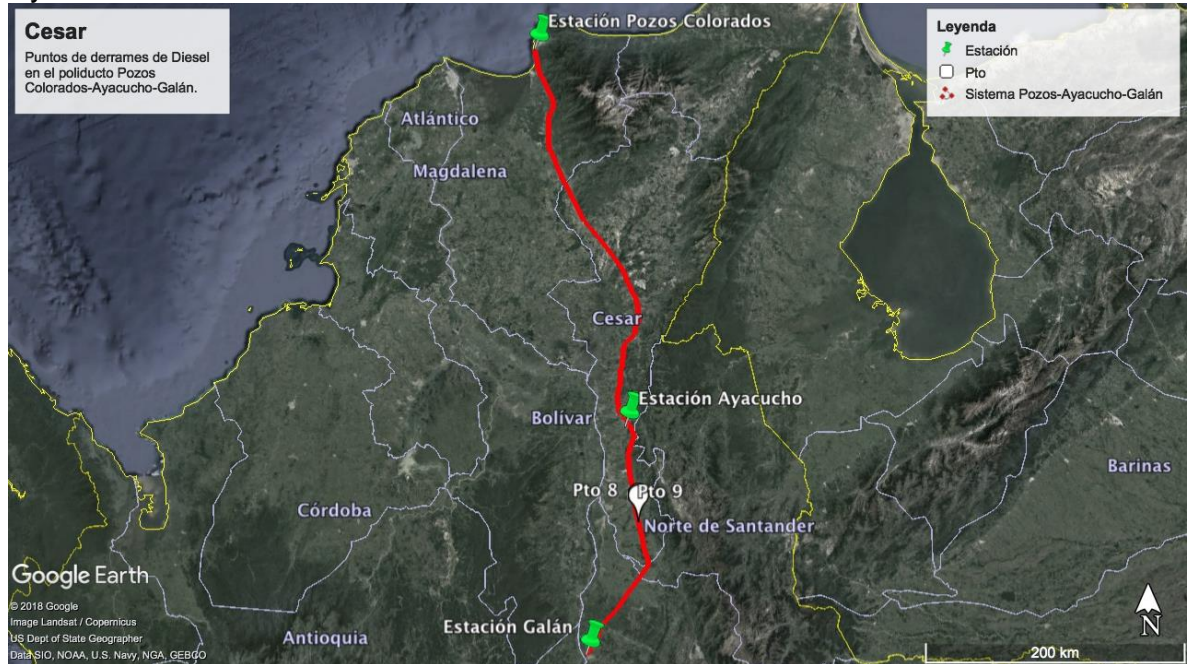
Tabla 12. Derrames de Diésel reportados por CENIT, 2018-2019

No.	Sistema Poliducto	Ubicación	Fecha (DD/MM/AA)	Volumen (Barriles)	
VALLE DEL CAUCA					
1	Buenaventura – Yumbo	PK 56+975	Dagua	04/01/18	Por determinar
2	Buenaventura – Yumbo	PK 044+728	Buenaventura	01/06/18	0,41
3	Buenaventura – Yumbo	PK 002+900	Buenaventura	21/06/18	0,024
4	Buenaventura – Yumbo	PK 006+827	Buenaventura	22/06/18	0,265
5	Buenaventura – Yumbo	PK 034+222	Buenaventura	19/07/18	0,0238
6	Buenaventura – Yumbo	PK 003+298	Buenaventura	01/08/18	0,11
7	Buenaventura – Yumbo	PK 052+790	Dagua	21/01/19	Por determinar
CESAR					
8	Pozos colorados –	PK 388+990	San Martín	21/01/18	496,28
9	Ayacucho – Galán	PK 389+040			
SANTANDER					
10	Galán – Chimitá	PK 33+657	Barrancabermeja	23/05/18	0,714
BOLÍVAR					
11	Cartagena - Baranoa	PK 030+042	Santa Rosa	21/10/18	1
BOYACÁ					
12	Galán – Puerto Salgar	PK 191+228	Puerto Boyacá	13/11/18	3,16
13	Poliducto de Oriente*	PK 182+704	Sutamarchán	13/12/18	Por Determinar

*Sistema Sebastopol – Tocancipá

Fuente: CENIT TRANSPORTE Y LOGÍSTICA DE HIDROCARBUROS S.A.S. <participacion.ciudadana@cenit-transporte.com.co>. “Respuesta a su petición No. 467196: Derrames de diésel”. [correo electrónico]. 27 de febrero de 2019. Enviado a autoras del proyecto.

Figura 9. Localización de los puntos 8 y 9 en el sistema Pozos Colorados – Ayacucho – Galán



Fuente: GOOGLE EARTH. Mapa de los departamentos por donde atraviesa el poliducto Pozos colorados – Ayacucho – Galán. Escala 1:200. Bogotá. 2018.

Tabla 13. Coordenadas geográficas angulares de los puntos 8 y 9

Punto	Norte	Oeste
8	7° 58' 51,26''	73° 31' 17,55''
9	7° 58' 19,51''	73° 31' 10,13''

Fuente: GOOGLE EARTH. Mapa de los departamentos por donde atraviesa el poliducto Pozos colorados – Ayacucho – Galán. Escala 1:200. Bogotá. 2018.

3.2 SELECCIÓN DEL SUELO

La Subdirección de Agrología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), realiza los levantamientos generales de suelos de los departamentos del Territorio Colombiano y, mediante mapas suministran información referente a características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, entre otras, las cuales permiten determinar la potencialidad y limitaciones de uso del suelo.

Un shapefile es un formato vectorial sencillo de almacenamiento digital en el que se guarda la localización de elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. Con el shapefile del departamento del Cesar se tiene acceso a esta información, y para su ejecución se hace uso del programa QGIS. En este se pueden observar los diferentes tipos de suelo que existen en el departamento, además de ubicar las coordenadas de los puntos afectados por los incidentes. Para esto, antes se deben convertir las coordenadas geográficas angulares (tabla

13) en coordenadas decimales (tabla 14), ya que estas son el tipo de coordenadas que acepta el programa.

Tabla 14. Coordenadas decimales de los puntos 8 y 9

Punto	Latitud	Longitud
8	7,9809	-73,5215
9	7,9721	-73,5195

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las coordenadas, se ingresan y se ubican los puntos en QGIS, como se observa en la figura 10, para así identificar las respectivas unidades cartográficas de los puntos 8 y 9 detallando los tipos de suelo presentes allí; PVFa (Punto 8) y PVEa1 (Punto 9).

- **PVFa⁵⁵**: Esta unidad cartográfica se encuentra en jurisdicción de diferentes municipios del Cesar, como Aguachica, La Gloria, Gamarra, Río de Oro, Pailitias, San Martín, entre otros; está ubicado entre los 500 y 1.000 msnm. La zona presenta clima cálido húmedo con precipitaciones entre 2.000 y 4.000 mm anuales, y temperatura mayor a 24 °C, con pendientes entre 0 y 3%, es decir, es ligeramente plana.

Estos suelos son profundos, bien y excesivamente drenados, y presentan texturas gruesas a muy gruesas; con reacción fuertemente ácida y moderadamente alcalina y la fertilidad natural es alta.

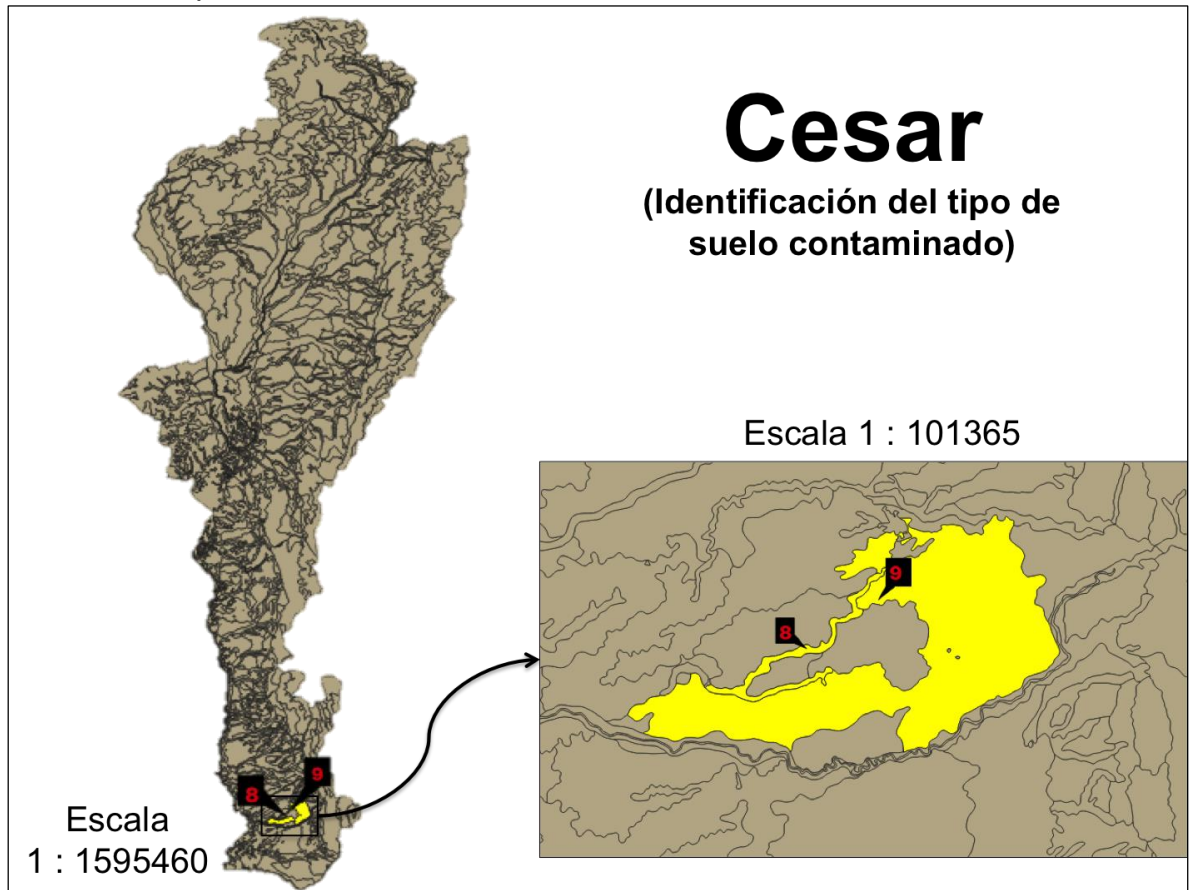
- **PVEa1⁵⁶**: Esta unidad cartográfica se encuentra en jurisdicción de diferentes municipios del Cesar, como Aguachica, La Gloria, Gamarra, Río de Oro, Pailitias, San Martín, entre otros; está ubicado entre los 500 y 1.000 msnm. La zona presenta clima cálido húmedo con precipitaciones entre 2.000 y 4.000 mm anuales, y temperatura promedio de 24 °C, con pendientes entre 0 y 3%, es decir, es ligeramente plana, y erosión ligera.

Estos suelos son profundos y moderadamente profundos, bien drenados, y presentan texturas medias a muy finas; con reacción fuertemente ácida y moderadamente alcalina y la fertilidad natural es baja y alta.

⁵⁵ INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Cesar Escala 1 : 100.000. *En: Descripción de los suelos de las unidades cartográficas de suelos*. Bogotá: IGAC, 2016. p. 262.

⁵⁶ *Ibid.*, p. 259-260.

Figura 10. Localización de los puntos 8 y 9 en el departamento del Cesar, mediante shapefile en QGIS



Fuente: QGIS. Shapefile del departamento del Cesar. Escala 1:1595460. Bogotá: IGAC, 2014. Planos disponibles en: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Identificados los grupos texturales de las unidades cartográficas PVFa y PVEa1, se determina cuál es el porcentaje de presencia de cada uno de estos en el departamento del Cesar, siendo el 23,5%, 58,7% y 17,8% pertenecientes a los grupos de textura gruesa, media y fina, respectivamente. (Anexo B).

Los suelos de textura media tienen el mayor porcentaje de presencia a nivel departamental (Cesar) y nacional, contando con un 55,8% (Anexo C) de presencia en el país, ya que se encuentran en diferentes y extensos sectores de todos los pisos climáticos de Colombia. Por tal razón, se especifican las clases texturales pertenecientes a este grupo en la siguiente tabla.

Tabla 15. Clasificación del grupo de textura media

IGAC	FAO*
Franco arcillo arenosa	Franco
Franco arcillosa	Franco limosa
Franco arcillo limosa	Limosa
Limosa	

(*) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Fuente: Elaboración propia.

Como características generales de los suelos de textura media, se resalta que tienen combinaciones adecuadas de fracciones granulométricas que proporcionan un suministro de agua y almacenamiento de nutrientes apropiado, al igual que permite una aireación favorable y una facilidad de preparación para la siembra. Sin embargo, si estos suelos no se manipulan adecuadamente, pueden presentar problemas relacionados con la degradación de la estructura, ser susceptibles a la erosión y deteriorar las características físicas, afectando la relación de agua-aire existente.

Con el fin de seleccionar una clase textural para el estudio experimental, se hace uso del criterio de permeabilidad, ya que está ligado a la textura, y permite determinar la capacidad que tiene el suelo para que un fluido transite por los espacios vacíos que esté presente.

3.2.1 Permeabilidad. Los suelos están conformados por sistemas de 2 o 3 fases, los cuales pueden ser partículas sólidas y gas, partículas sólidas y líquidos, o partículas sólidas, gas y líquido. El líquido normalmente es agua y el gas es vapor de agua o aire. Los espacios donde estos pueden fluir o se pueden encontrar se denominan poros, esta propiedad se conoce como porosidad, la cual influye en la permeabilidad del suelo.

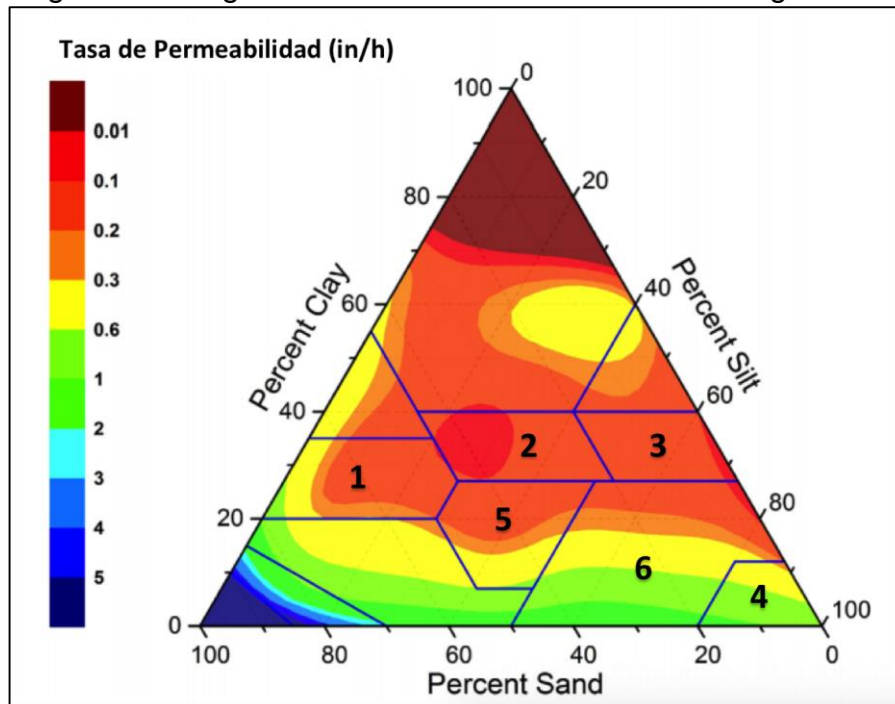
La permeabilidad de los suelos consiste en la capacidad con que los fluidos atraviesan sus poros, por tanto, entre más permeable sea un suelo mayor será la infiltración del fluido en él, y, a medida que aumente su profundidad, el fluido llegará a un punto en el que encuentre un horizonte impermeable. Es decir, los suelos están formados por diferentes capas que corresponden a suelos con clases de textura diferentes, en donde cada una de ellas tiene propiedades físicas y químicas diferentes, lo que conlleva a una limitante de la permeabilidad del suelo: el fluido atravesará el horizonte del suelo hasta encontrar una clase textural con baja permeabilidad. Sin embargo, para analizar esta propiedad, se debe estudiar cada capa por separado.

Como se aprecia en la tabla 5 (Interpretación de la permeabilidad del suelo), la permeabilidad se mide en función de la velocidad del flujo de agua a través del

suelo durante un periodo determinado, y normalmente se expresa como una tasa de permeabilidad (cm/h; mm/h; cm/día ó in/h).

A partir del diagrama de velocidad de infiltración de agua (Figura 11) presentado por AGRO STREAM (Agricultura Inteligente), se identifican las tasas de permeabilidad para las clases texturales pertenecientes al grupo de textura media dadas por el IGAC y la FAO presentadas en la tabla 15.

Figura 11. Diagrama de velocidad de infiltración de agua



Fuente: AGRO STREAM. Mapas de texturas del suelo. [diapositivas]. Zaragoza: Agricultura Inteligente, 2018. 28 diapositivas. Disponible en: <https://coiaanpv.org/forodesarrollo/wp-content/uploads/2018/02/Presentaci%C3%B3n-Agrostream-FIMA2018-V01.pdf>

Para registrar las tasas de permeabilidad de cada clase textural (Cuadro 3), se identifican los colores de cada región y su respectivo valor según la leyenda, la cual se encuentra entre el límite superior 0,01 in/h y el límite inferior 5 in/h, esto con el fin de interpretar los datos a partir de la información entregada por la FAO. (Anexo D).

Una vez interpretada la tasa de permeabilidad (Cuadro 3), se elige la clase textural para el desarrollo experimental tomando como referencia y analizando las condiciones extremas. Estas son:

- Presentar un suelo con permeabilidad muy lenta que pueda retener el fluido en la superficie, o,
- Una permeabilidad moderada que deje fluir el líquido y a su vez retenerlo en su estructura debido a la porosidad que el suelo presenta.

Dicho lo anterior, el escenario a trabajar es aquel que tiene una permeabilidad moderada, ya que permite que el contaminante no quede retenido en la superficie del suelo tal como ocurriría con el primer escenario; si no que se busca que este tenga interacción con el suelo, lo penetre y así dificulte su remoción.

Cuadro 3. Interpretación de la tasa de permeabilidad del grupo de textura media

No	Clase textural	Tasa de Permeabilidad (in/h)		Interpretación			
		Límite Superior	Límite Inferior	Muy Lenta	Lenta	Moderadamente Lenta	Moderada
1	Franco Arcillo Arenosa	0,01	1	X	X	X	X
2	Franco Arcillosa	0,01	0,2	X	X	X	
3	Franco Arcillo Limosa	0,01	0,2	X	X	X	
4	Limosa	0,2	2			X	X
5	Franco	0,01	1	X	X	X	X
6	Franco Limoso	0,01	2	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia

Por tal razón y según la Cuadro 3, las posibles clases texturales para el tratamiento son: Franco Arcillo Arenosa (No 1), Limosa (No 4), Franco (No 5) y Franco Limoso (No 6), ya que pueden presentar una permeabilidad moderada. Sin embargo, y con el fin de seleccionar una de las cuatro, se busca que el rango de permeabilidad tienda a ser únicamente moderado como ocurre con la clase textural Limosa, que presenta una permeabilidad moderadamente lenta a moderada. En el caso de las otras tres clases texturales, el rango es demasiado amplio, lo que teóricamente abarcaría tanto el primer como el segundo escenario. Es por esto que la **textura Limosa** se elige para la evaluación del tratamiento.

3.2.2 Prueba textural en campo. Con el fin de cerciorar que la selección del suelo (antes de realizar análisis en el laboratorio) corresponda a una textura limosa, se realiza una prueba en campo para la determinación de la textura al tacto ya que no tiene implicaciones económicas. De esta manera, se puede hacer una pre-selección del suelo para después corroborar con resultados del laboratorio.

Para esto, se emplea el procedimiento propuesto por la Universidad Politécnica de Valencia en un video didáctico, el cual enseña una serie secuencial de ensayos que permiten distinguir las diferentes clases texturales del suelo, ensayos que se fundamentan en las características que diferencian las tres fracciones que puede presentar un suelo: arena (rugosa), limo (suave) y la arcilla (presenta plasticidad cuando se humedece).⁵⁷

Para iniciar el procedimiento, se debe escoger una muestra de suelo y tamizarla con una malla que tenga como máximo una abertura de 2 mm (como se indica en la figura 12), esto con el fin de garantizar una muestra homogénea. Una vez obtenida la muestra tamizada, se procede a tomar una sección de esta y humedecerla hasta formar una esfera con las manos. Los ensayos que siguen se detallan con mayor claridad en la figura 12, así como el criterio de identificación de las 12 clases texturales que identifica el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés).

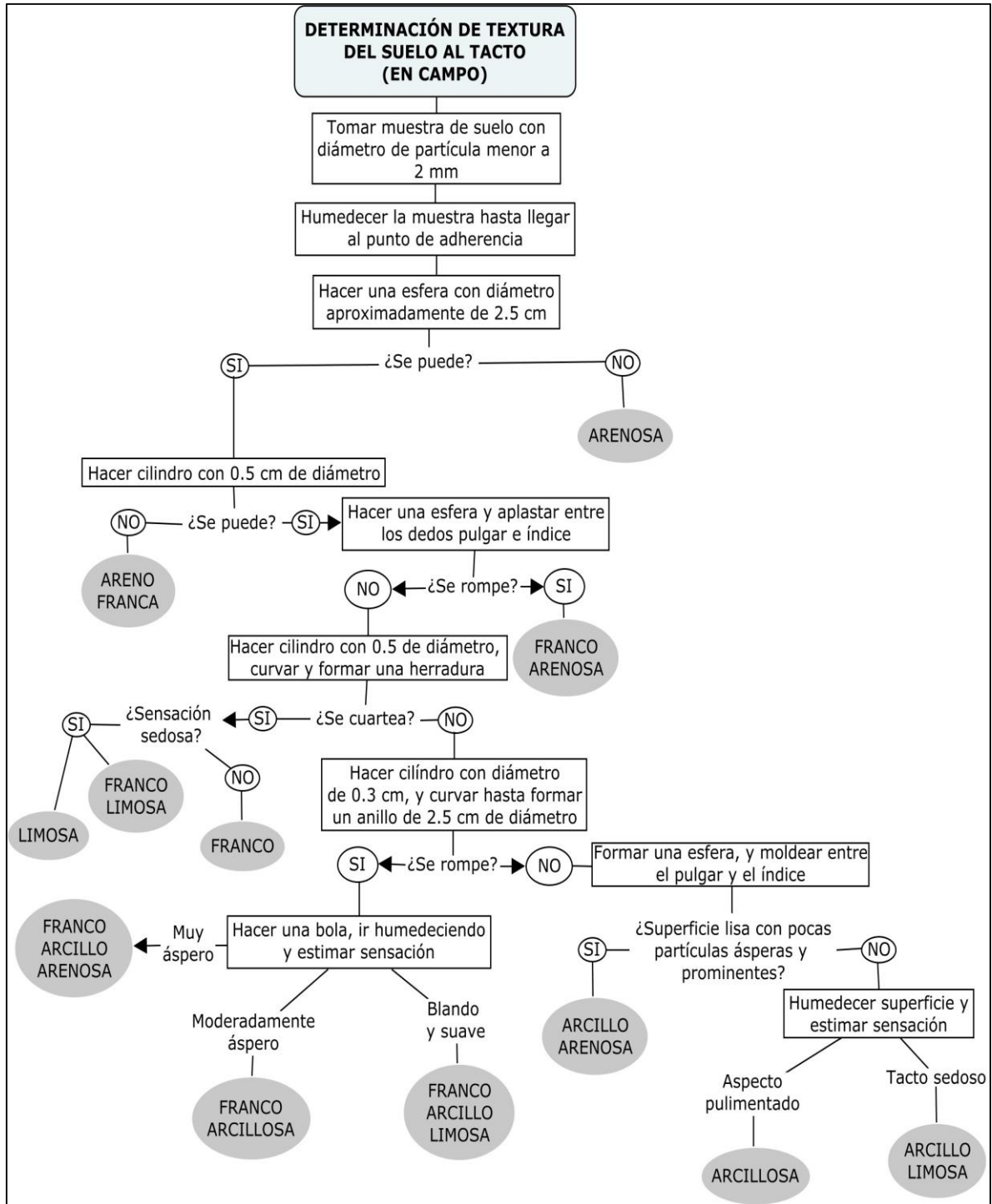
Teniendo en cuenta el procedimiento de la identificación de la textura del suelo en campo, se recopilan diferentes tipos de suelos para evaluar en la vereda Río Dulce, ubicada en Villeta (Cundinamarca), puesto que es el sitio en donde se desarrolla la fase experimental. Esta recopilación se realiza con asesoría de campesinos que trabajan la tierra de la zona.

Se tomaron seis muestras de suelo de diferentes lugares con el fin de aplicar el procedimiento mencionado, del cual se concluye la obtención de las siguientes clases texturales:

1. Arcillo limoso (Finca La Lupita)
2. Arcillo arenoso (Finca El Vergel)
- 3 y 4. Limoso o Franco Limoso (Finca Las Juntas)
5. Areno Franca (Finca El Vergel)
6. Limoso o Franco Limoso (Finca La Lupita)

⁵⁷ BAUTISTA, María y OLIVER, Joana. Determinación de la textura al tacto. [Video]. 2017. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/84041> el 25 de mayo de 2019.

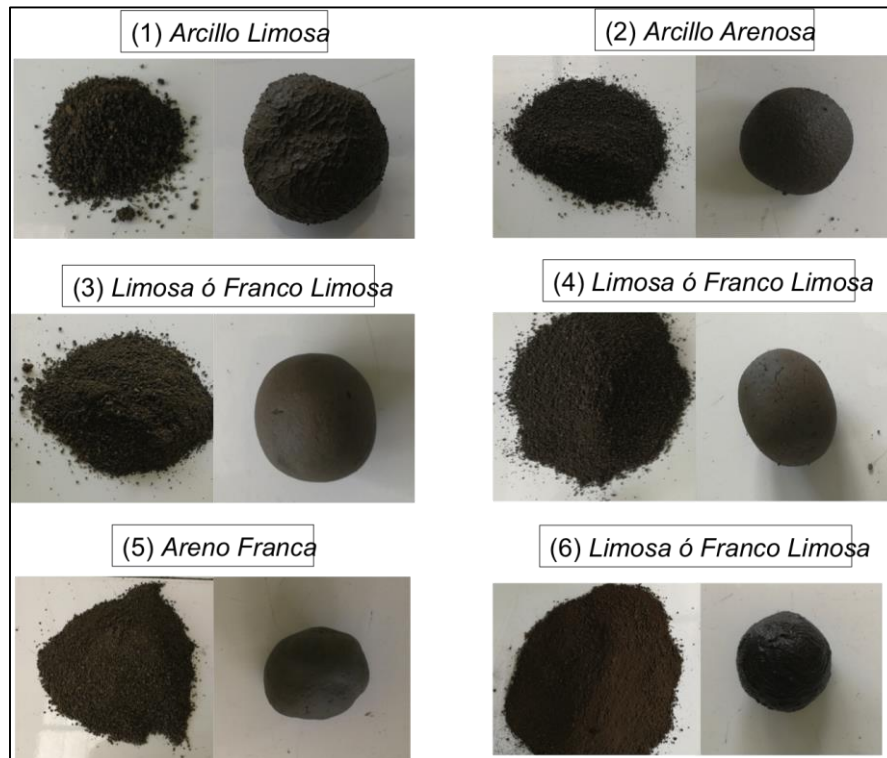
Figura 12. Procedimiento para identificar la textura del suelo en campo



Fuente: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. Determinación de la textural al tacto. [video]. YouTube. Valencia: España. (19 octubre 2019). 8:13 minutos. [Consultado 15 abril 2019]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=V4uSq6IH5TM>

En la figura 13, se pueden apreciar las imágenes correspondientes a cada tipo de suelo una vez pasa por el tamiz con malla de abertura 2 mm, así como la esfera obtenida cuando se humedece una fracción del suelo (teniendo en cuenta que la humectación de este debe hacerse sin llegar al punto de adherencia; es decir, que no tenga una sensación pegajosa).

Figura 13. Suelos seleccionados para determinación de a textura al tacto



Fuente: Elaboración propia

Al ubicar la zona de la vereda en donde se encuentra el suelo de clase textural limosa, se realiza un muestreo para realizar el análisis de parámetros físicos en el laboratorio que confirmen este tipo de textura y evaluar los parámetros presentados en la Norma Louisiana 29B.

Este muestreo de suelo se realiza el día 8 de mayo del presente año, a las 11:30 de la mañana, en la finca "Las Juntas", ubicada en la Vereda Río Dulce (Villeta, Cundinamarca). En cuanto a las condiciones meteorológicas presentadas este día, se detalla lo siguiente: Había presencia de viento, era un día soleado y no había precipitación. La muestra se toma a una profundidad de 0,4 m en un área de aproximadamente 1 m²; para la extracción se utiliza una pala de jardinería. El muestreo es compuesto, ya que se toman varias submuestras y se unifican después al mezclarlas. Estos datos se recopilan con el fin de complementar la

información del muestreo del suelo, como se propone en la práctica, “Técnicas de muestreo de suelos y preparación de muestras”⁵⁸.

3.3 ANÁLISIS DEL SUELO

Para la caracterización de la línea base experimental y cuantificación de la eficiencia de OSE II, se especifican las principales características físicas y químicas antes de contaminar el suelo, para luego confrontar con resultados mediante un nuevo análisis después de implementar el proceso de biorremediación.

3.3.1 Análisis Físico. Corresponde al estudio de las propiedades físicas más importantes del suelo, estas son: la textura, donde se especifica la cantidad que el suelo posee de partículas de arena, limo y arcilla; la densidad real y aparente; y por último la porosidad⁵⁹. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 16.

Con los resultados obtenidos, se confirma que el suelo que se va a trabajar en el desarrollo experimental corresponde a una textura Limosa, acertando así en la determinación realizada en campo, con especificación del 6%, 88% y 6% correspondiente a una fracción arenosa, limosa y arcillosa, respectivamente.

Tabla 16. Análisis físico del suelo a trabajar

Parámetro	Unidades	Valor Obtenido
Textura	-	Limosa
% Arena	% P/P	6
% Limo	% P/P	88
% Arcilla	% P/P	6
Densidad real	g/cm ³	1,56
Densidad aparente	g/cm ³	0,79
Porosidad	%	49

Fuente: Resultados del laboratorio INGELAB. Anexo E.

Por otro lado se obtuvo la densidad relativa, que incluye en su análisis los valores tanto de poros como de sólidos presentes en el suelo, reflejando la porosidad total del mismo. Valores de densidad relativa bajos indican una buena condición porosa del suelo y, valores altos expresan condiciones pobres para el crecimiento de las raíces de las plantas, debido a que la aireación es poca y la velocidad de infiltración del agua se reduce. Según el manual de prácticas de campo y del

⁵⁸ MUSKUS, Angélica y QUINTERO, Claudia. Manual de Laboratorio Caracterización de Suelos. Universidad Nacional de Colombia, 2016. p. 22-29.

⁵⁹ HERNEY, Geovanny. Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar bajo la aplicación de biosólidos. Trabajo de grado ingeniero agrícola. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola, 2012. p. 16-22.

laboratorio de suelos del SENA, para suelos de textura limosa la densidad aparente debe ser menor a 1,40 g/cm³ para garantizar una aireación e infiltración del agua ideal, por tanto, la densidad aparente del suelo a trabajar cumple con este límite ideal.

Para la densidad real no se registran valores límites o de comparación, ya que este parámetro al medir la fase sólida del suelo puede presentar variaciones en cuanto al contenido de materia orgánica que presente.

Por último, el parámetro de la porosidad indica los espacios porosos que existen en el suelo, con un valor del 49%, del cual se interpreta que la porosidad es Media⁶⁰: hay buena aireación y capacidad de infiltración del agua, pero para mejorar estas condiciones, este valor debe estar por encima del 60%. Sin embargo, hay que resaltar que esta propiedad está directamente relacionada con la textura y la densidad del suelo.

3.3.2 Análisis de parámetros estipulados por la norma Louisiana 29B.

Consiste en analizar los parámetros propuestos por la norma Louisiana 29B: Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo⁺⁶, Plomo, Mercurio, Selenio, Plata, Zinc, Hidrocarburos totales del petróleo (TPH), Grasas y aceites, Conductividad eléctrica, Relación absorción de sodio (RAS), Porcentaje de sodio intercambiable (PIS), pH y contenido de Humedad, con el propósito de observar cómo se encuentran estos antes de realizar la contaminación.

En la tabla 17, no se presenta el parámetro Grasas y Aceites, ya que no se evaluó para el suelo total, sino que se tomó este análisis para cada repetición y escenario del diseño de experimentos. Estos valores se presentan en el capítulo siguiente, para tener mejor trazabilidad del parámetro a estudiar (grasas y aceites).

A partir del análisis presentado en la tabla 17, se concluye que el suelo cumple con todos los parámetros presentados en la Norma Louisiana 29B, ya que estos se encuentran por debajo del límite máximo o en el rango establecido.

Tabla 17. Parámetros de la norma Louisiana 29B del suelo a trabajar

Parámetro	Unidades	Valor obtenido	Norma Louisiana 29B	¿Cumple con la Norma?
Arsénico	mg/Kg	<0,010	10	Sí
Bario	mg/Kg	19,32	20.000	Sí
Cadmio	mg/Kg	0,121	10	Sí

⁶⁰ INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Suelos y tierras de Colombia. En: *Propiedades físicas fundamentales*. Tomo II. Bogotá: IGAC, 2016. p. 31. ISBN: 978-9588323-85-5.

Tabla 17. (Continuación)

Parámetro	Unidades	Valor obtenido	Norma Louisiana 29B	¿Cumple con la Norma?
Cromo⁺⁶	mg/Kg	6,97	500	Sí
Plomo	mg/Kg	<0,25	500	Sí
Mercurio	mg/Kg	<0,010	10	Sí
Selenio	mg/Kg	<0,100	10	Sí
Plata	mg/Kg	<1,25	200	Sí
Zinc	mg/Kg	22	50	Sí
Conductividad Eléctrica	dS/m	0,19	<4	Sí
Relación Absorción de Sodio (RAS)	-	0,28	<12	Sí
Porcentaje de Sodio Intercambiable (PIS)	%	1,38	<15	Sí
pH	-	7	6 a 9	Sí
Contenido de Humedad	%	32,41	<50	Sí

Fuente: Resultados del laboratorio INGELAB e HIDROLAB. Anexo E.

4. INFLUENCIA DE OSE II EN LA DESCONTAMINACIÓN DEL SUELO

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo experimental del proyecto, por tanto, se realiza la descripción de las variables a controlar en el diseño de experimentos al igual que el montaje experimental, asimismo, se presentan los resultados de la prueba y el análisis pertinente a lo obtenido.

4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

“El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente.”⁶¹

Para evaluar la efectividad de la tecnología OSE II en la remoción del contaminante (grasas y aceites) del suelo, se establecen a continuación los parámetros, condiciones y consideraciones necesarias para implementar apropiadamente un análisis mediante un diseño factorial.

4.1.1 Factores, niveles y variable respuesta. En todo proceso, intervienen distintos tipos de factores (controlables o no controlables) con sus respectivos niveles y tratamientos sobre una(s) variable(s) de respuesta⁶².

4.1.1.1 Identificación y selección de factores y niveles

- **Factores:** Un factor es aquella variable de interés cuyo posible efecto sobre la respuesta se quiere estudiar; los factores controlables son aquellas variables que se pueden fijar en un nivel dado y usualmente se controlan dentro de la operación normal del proceso, a diferencia de los no controlables, cuyas variables no pueden ser controladas durante la operación⁶³.

En la Tabla 18 se exponen los factores controlables y no controlables involucrados en la actuación de la tecnología OSE II en suelos contaminados.

Tabla 18. Variables involucradas en la biorremediación con OSE II

Variable	Factor controlable	Factor no controlable
Temperatura ambiente		x
pH	x	
Contenido de humedad		x
Dosificación OSE II	x	

⁶¹ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. Introducción al análisis de experimentos. 2 ed. McGraw Hill, 2008. 6 p. ISBN-10: 970-10-6526-3.

⁶² *Ibíd.*, p. 7.

⁶³ *Ibíd.*, p. 8.

Tabla 18. (Continuación)

Variable	Factor controlable	Factor no controlable
Tipo de contaminante	x	
Aireación	x	

Fuente: Elaboración propia

A continuación se detallan estas variables.

- a) Temperatura ambiente:** La temperatura del ambiente es un factor que no se puede controlar, sin embargo, OSE II es efectivo en un amplio rango de temperaturas, que abarcan desde los -2 ° C hasta los 50 °C⁶⁴.

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de la fase experimental del tratamiento es en Villeta, Cundinamarca, en donde la temperatura oscila entre los 19 °C y 30 °C, por ende, no se generan inconvenientes con este factor.

- b) pH:** OSE II es un producto completamente estable y reactivo que actúa en un rango de pH de 3,5 a 11,7⁶⁵, por lo que puede utilizarse y es efectivo en casi cualquier tipo de suelo. Es un factor controlable porque por distintos métodos puede modificarse su acidez o alcalinidad cuando sea necesario.

- c) Contenido de humedad:** El contenido de humedad es sumamente importante ya que garantiza la supervivencia y funcionamiento óptimo del metabolismo de los microorganismos encargados de la descomposición del contaminante. Para la actuación de la tecnología OSE II, el suelo siempre debe tener un porcentaje de humedad por encima del 30%.

Como se ha mencionado, la tecnología OSE II estimula el crecimiento de bacterias que descomponen el contaminante en agua y dióxido de carbono, y, al no entrar en detalle en su proceso metabólico, no se conoce cuál es la cantidad de agua que se desprende en el proceso ni la que puede llegar a evaporarse.

- d) Dosificación:** Es considerada como la variable de mayor importancia ya que permite establecer si hay influencia directa en el grado de remoción con la cantidad de producto dosificado. Es un factor controlable porque puede modificarse la relación cantidad de OSE II-cantidad de contaminante.

⁶⁴ OIL SPILL EATER INTERNATIONAL, CORP. OIL SPILL EATER II Technical Information. Natural Biologic Enzyme. Dallas, Texas, 2010. 233 p. [en línea]. Disponible en: http://www.osei.us/wp-content/uploads/OSEI-Manual_FINAL-2016-1.pdf

⁶⁵ *Ibíd.*, p. 11.

- e) **Tipo de contaminante:** Particularmente en este caso, el tipo de contaminante es un factor controlable, ya que se decide cuáles y en qué cantidad son vertidos en el suelo. Más adelante se detallará sobre la elección y cantidad utilizada de cada uno ellos (diésel y biodiésel).
- f) **Aireación:** La biodegradación de contaminantes generalmente es más eficiente cuando se hace mediante microorganismos aerobios, por ende, debe garantizarse esta condición a los mismos. Además, aireando el suelo contaminado se permite el escape de contaminantes volátiles.

En principio, cualquier factor (controlable o no) puede tener o no influencia sobre la variable de respuesta, pero, para fines de un diseño de experimento, se deben seleccionar aquellos factores que se considere puedan tener efecto sobre la variable de interés.

De acuerdo con la descripción de las variables de la tabla 18, en esta ocasión, únicamente son factores de estudio la dosificación de OSE II y el tipo de contaminante. Las demás, se toman como variables fijas, teniendo en cuenta que éstas funcionan en un amplio rango de posibilidades o que su implementación ya garantiza la mejora de resultados en la variable de respuesta.

- **Niveles:** Son los diferentes valores que se asignan a cada factor⁶⁶. Un *tratamiento* es la combinación de niveles de todos los factores estudiados.

A continuación se especifican los factores a tener en cuenta en la fase experimental, al igual que los niveles que corresponden a cada uno, así como la justificación de los mismos.

- a) **Niveles del factor dosificación de OSE II:** Con el fin de optimizar la biorremediación en cuanto al tiempo que tarda el proceso de descontaminación del suelo, y tomando como punto de referencia la relación producto-contaminante que actualmente maneja la empresa EOM CONSULTING S.A.S para reducir TPH en un suelo contaminado, 1 unidad volumétrica de OSE II remedia 50 unidades volumétricas de contaminante (1: 50), se determinan los siguientes niveles para el factor dosificación: 1: 25 (nivel 1), 1: 37,5 (nivel 2) y 1: 50 (nivel 3).

La elección de estas dosificaciones se hace bajo la hipótesis de que a mayor cantidad de producto (OSE II) el proceso de biorremediación será mucho más rápido. Partiendo de datos entregados por EOM CONSULTING S.A.S, en cuanto a las contingencias de derrames de diésel atendidas con la aplicación

⁶⁶ GUTIÉRREZ PULIDO. Op. cit., p. 8.

de la tecnología OSEII, se procede a justificar las dosificaciones a evaluar en el proyecto bajo la experiencia de la empresa.

Por tanto, en el cuadro 4 se presentan los análisis de grasas y aceites realizados en una contingencia presentada en Aguachica (Cesar).

Cuadro 4. Tratamiento de grasas y aceites atendido por EOM CONSULTING S.A.S

LABORATORIO CONTRATISTA	HIDROLAB		
UBICACIÓN	Aguachica - Cesar		
FECHA DE MUESTREO	DÍAS	G&A (mg/Kg)	G&A (%)*
27 – Mayo – 2018	0	167.902	16,79
01 – Junio - 2018	5	203.138	20,31
18 – Julio - 2018	52	47.867	4,78

Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

(*) 1 mg/Kg = 1 ppm; 10.000 ppm = 1%.

La reducción obtenida de grasas y aceites durante la ejecución de la prueba, realizada con una proporción de dosificación 1:50 (OSEII:Contaminante), fue del 76.46%, valor obtenido con la ecuación 3:

Ecuación 3. Porcentaje de reducción del proyecto Aguachica (Cesar)

$$\% \text{ Reducción}_{\text{obtenido}} = \left[1 - \left(\frac{\%G\&A_{t=52}}{\%G\&A_{t=5}} \right) \right] * 100\%$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

%Reducción Obtenido: porcentaje de reducción obtenido

%G&A_{t=52}: Porcentaje de grasas y aceites en el día 52

%G&A_{t=5}: Porcentaje de grasas y aceites en el día 5

No obstante, para llegar a obtener una concentración del 1% en G&A la reducción debe ser del 95.08%, la cual en teoría se puede alcanzar si se realiza el proyecto en 58 días; este dato se obtiene mediando la aplicación de la ecuación 4.

Ecuación 4. Cálculo de días para obtener 1% en G&A en proyecto Aguachica (Cesar)

$$t_{\text{Días}} = \% \text{Reducción}_{\text{Norma}} * \frac{t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}}{\% \text{Reducción}_{\text{obtenido}}}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$t_{\text{Días}}$: tiempo en días para obtener G&A igual a 1%

% Reducción Norma: Porcentaje de reducción para llegar a cumplir con una concentración de grasas y aceites del 1% o 10.000 ppm

t_{final} : tiempo en días del final de la operación (ej.: 52 días)

t_{inicial} : tiempo en días de la concentración más alta de G&A (ej.: 5 días)

% Reducción Obtenido: Porcentaje de reducción obtenido en la ecuación 3

Teniendo en cuenta lo anterior, se analiza cuál debe ser la relación de OSEII y contaminante, para obtener un suelo remediado en 28 días (tiempo de estudio del proyecto) con un porcentaje de reducción de 95,08%; por tal se plantea lo siguiente (cuadro 5):

Cuadro 5. Relación de dosificación OSE II respecto a los días de tratamiento

Unidad Volumétrica de OSEII	Unidades Volumétricas de Contaminante	% De Reducción	Días
1	50	95,08	58
1	X	95,08	28

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 5 se expresa: En 58 días, utilizando la relación de dosificación OSEII:Contaminante, 1 : 50 hay un porcentaje de reducción del 95,08%, el cual cumple con la norma; por tanto, si se cuenta con 28 días para la descontaminación, ¿Qué relación de OSEII: Contaminante se debe realizar, para mantener el mismo porcentaje de reducción, 95,08%?

Como respuesta a la pregunta planteada, se obtiene que la relación de dosificación debe ser 1:24; es decir, se debe reducir hasta un 52% con respecto a la estándar (1:50) para el cumplimiento de la norma a los 28 días.

De este modo, se toma la decisión de reducir la relación de dosificación en un 50%, y con el fin de hacer este análisis de manera escalonada para observar el comportamiento, se realiza el desarrollo del experimento con tres dosificaciones (Relación OSEII : Contaminante):

1. Reduciendo la dosificación en un 50%: 1 Unidad volumétrica de OSEII remedia 25 unidades volumétricas de contaminante.
2. Reduciendo la dosificación en un 25%: 1 Unidad volumétrica de OSEII remedia 35,7 unidades volumétricas de contaminante.
3. Manteniendo la dosificación estándar: 1 Unidad volumétrica de OSEII remedia 50 unidades volumétricas de contaminante.

b) Niveles del factor tipo de contaminante: El contaminante de interés que desea removerse del suelo es grasas y aceites. Como primer nivel se tiene diésel B10, ya que dentro de su composición un 10% es biodiésel proveniente de aceite de palma, además, es el combustible de mayor consumo en Colombia. Como segundo nivel se tiene biodiésel puro, tomando como referencia las futuras resoluciones en cuanto a la proporción de mezcla diésel-biodiésel, las cuales apuntan a un aumento del porcentaje de biodiésel en la mezcla.

4.1.1.2 Variable de respuesta. A través de esta se conoce el efecto de cada prueba experimental en cuanto a características de calidad o desempeño del proceso. El objetivo de muchos estudios experimentales es mejorar la(s) variable(s) de respuesta⁶⁷. En este caso, la variable de respuesta es *la concentración de grasas y aceites del suelo*, bajo el efecto de las distintas dosificaciones de OSE II y del tipo de contaminante.

4.1.2 Prueba de hipótesis. Previo al desarrollo estadístico del diseño de experimentos, se deben plantear hipótesis estadísticas, las cuales reflejan suposiciones acerca de la situación del problema; y posteriormente analizar los datos obtenidos mediante un análisis estadístico de los datos. Estas hipótesis se plantean para cada factor y para la interacción de estos, es decir, para el tipo de contaminante, la dosificación y la interacción que existe entre estos dos factores.

Primero, se debe realizar el planteamiento de la hipótesis nula (H_0), la cual indica que no existe diferencia en los valores de los niveles presentados, y por tanto el factor no tiene efecto en la variable de respuesta. Y luego se debe plantear la hipótesis alternativa (H_1), la cual contradice la hipótesis nula, afirmando que el factor tiene efecto en la variable de respuesta, ya que los resultados entre los niveles son diferentes. Por último, se aplica el mismo criterio de hipótesis nula y alternativa, para la interacción entre los factores.

A continuación, se plantean las hipótesis estadísticas.

- Factor Dosificación (α):
 - $H_0: \alpha = 0$. No hay efecto del factor dosificación de OSE II en la concentración de grasas y aceites.

⁶⁷ *Ibíd.*, p. 8.

- Hi: $\alpha \neq 0$. Hay efecto del factor dosificación de OSE II en la concentración de grasas y aceites.
- Factor Contaminante (β):
 - Ho: $\beta = 0$. No hay efecto del factor contaminante en la concentración de grasas y aceites.
 - Hi: $\beta \neq 0$. Hay efecto del factor contaminante en la concentración de grasas y aceites.
- Interacción entre los factores ($\alpha\beta$):
 - Ho: $\alpha\beta = 0$. No hay efecto de la interacción de factores en la concentración de grasas y aceites.
 - Hi: $\alpha\beta \neq 0$. Hay efecto de la interacción de factores en la concentración de grasas y aceites.

4.2 MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Para el desarrollo del proyecto, se realiza un diseño de experimentos factorial 2x3, en el que se busca estudiar el efecto de varios factores con el mismo interés sobre una variable de respuesta; así mismo, determinar la combinación óptima de los niveles de cada uno de los factores para seleccionar aquella con mayor rendimiento, corriendo aleatoriamente todas las posibles combinaciones.⁶⁸

Este diseño experimental tiene dos factores: Tipo de contaminante y Dosificación de OSE II, y cada uno cuenta con dos y tres niveles, respectivamente. El experimento se realiza por duplicado y su representación se presenta en el cuadro 6.

Este diseño de experimentos se realiza con ayuda de la herramienta estadística *Minitab*, la cual incluye una amplia gama de procedimientos estadísticos utilizados en la estimación de pruebas de hipótesis para una muestra.⁶⁹

Cuadro 6. Factores y niveles del diseño experimental

FACTORES	NIVELES			
Dosificación	3	1:25	1:37,5	1:50
Contaminante	2	Diésel B10	Biodiésel	
TRATAMIENTO				
Réplicas	2			
$T = 2 \times (2 \times 3) = 12$				

Fuente: Elaboración propia con base en software Minitab versión 18

⁶⁸ *Ibíd.*, p. 128.

⁶⁹ SOFTWARE. (25 de octubre de 2019). Minitab. *Descripción del producto*. Recuperado de: <https://software.com.co/p/minitab>

Para mayor entendimiento del desarrollo experimental, se presenta la matriz del diseño factorial (cuadro 7) en donde se tiene en cuenta la nomenclatura y distribución de las muestras. Adicionalmente, el experimento se realiza con un seguimiento cada 7 días durante 28 días; es por esto que la matriz presentada a continuación aplica para cada día de análisis de muestras, es decir, los días 7, 14, 21 y 28.

Cuadro 7. Matriz del diseño factorial

REPETICIÓN	DOSIFICACIÓN		CONTAMINANTE	
			DIÉSEL B10	BIODIÉSEL
1	1	1 : 25	D1.1	B1.1
2			D2.1	B2.1
1	2	1 : 37,5	D1.2	B1.2
2			D2.2	B2.2
1	3	1 : 50	D1.3	B1.3
2			D2.3	B2.3

Fuente: Elaboración propia

Teniendo definido esto, se da inicio al montaje y desarrollo de la fase experimental.

4.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental para evaluar la efectividad de la tecnología OSE II en la remoción de grasas y aceites del suelo limoso contaminado con diésel B10 y biodiésel se realizó en la finca La Lupita (Villeta, Cundinamarca), ya que es el lugar del cual se dispone para tener las muestras y darles un manejo adecuado. Cabe resaltar que el diésel B10 y biodiésel se compraron en una estación de Servicio de Terpel y en Bio D S.A., respectivamente, ya que son los distribuidores mayoristas a nivel nacional.

Este montaje consta de 4 etapas: distribución del suelo, contaminación del suelo con diésel B10 y biodiésel, aplicación de la tecnología OSE II y toma de muestras en los 28 días de seguimiento. Los procedimientos de cada una se describen a continuación.

4.3.1 Distribución del suelo. Para la distribución del suelo en recipientes de plástico de capacidad de 5 galones, se disponen 4 bultos de 50 kilogramos cada uno sobre un tapete plástico transparente (Imagen 1) para homogeneizar con ayuda de una pala. Después se divide este en dos porciones con el fin de facilitar la repartición en los recipientes.

La distribución para cada recipiente se realiza utilizando una báscula electrónica semi-industrial, con capacidad de hasta 200 Kg, en la cual se coloca el recipiente, se tara, y se agregan aproximadamente 7 Kg de suelo.

Imagen 1. Homogeneización del suelo



Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Toma de muestras del suelo sin contaminante. Una vez distribuido el suelo para cada desarrollo experimental, se toman muestras para realizar el análisis de grasas y aceites, con el fin de conocer este parámetro antes de contaminar el suelo. De tal manera, se obtienen los resultados presentados en la tabla 19, entendiéndose como SSC (suelo sin contaminar), D1 o D2 (destinado a contaminar con diésel B10 en primera y segunda repetición), y B1 o B2 (destinado a contaminar con biodiésel en primera y segunda repetición).

Tabla 19. Resultados de grasas y aceites para el suelo sin contaminar

	SSC – B1	SSC – B2	SSC – D1	SSC – D2
Concentración de grasas y aceites (ppm)	519	499	913	457

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados del contenido de grasas y aceites del suelo, se puede evidenciar que este se encuentra por debajo del valor permitido por la norma Louisiana 29B (10.000 ppm), y estos valores se atribuyen a grasas y aceites de origen vegetal o animal.

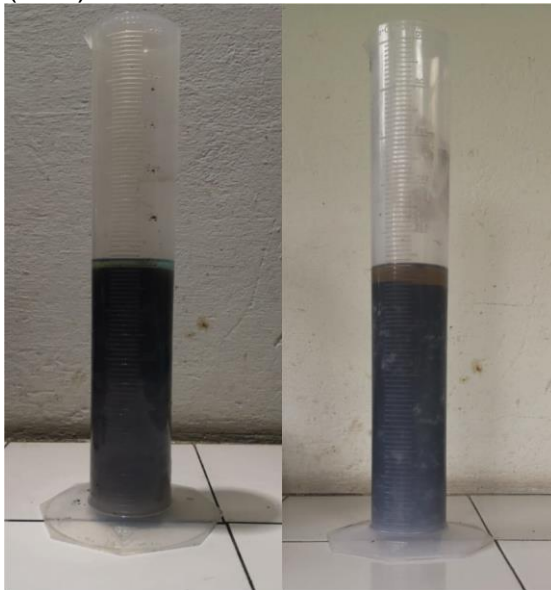
4.3.3 Contaminación del suelo. Para calcular el volumen de cada contaminante que debe agregarse a cada recipiente con suelo se hace el siguiente procedimiento:

1. Se calcula la densidad del suelo (Ver anexo F).
2. Una vez conocida, se agrega un volumen considerable de suelo (500 ml) a una probeta y se agregan progresivamente cantidades conocidas de contaminante (diésel B10 y biodiésel) hasta saturar la muestra (Imagen 2); es decir, hasta cuando todos los poros del suelo estén ocupados por el líquido (esto se conoce al observar en la probeta que el contaminante deja de descender después de determinado tiempo).

De tal forma, se obtiene que 500 ml de suelo se saturan con 199 ml de diésel o 246 ml de biodiésel. La cantidad requerida de diésel es menor ya que este presenta una viscosidad cinemática mayor que el biodiésel, siendo de $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ y $4,469 \text{ mm}^2/\text{s}$ para diésel y biodiésel respectivamente, a $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Por tanto, el diésel presenta un mayor esfuerzo para desplazarse en el suelo.

3. Se calcula (Cuadro 8) y agrega el volumen de contaminante necesario para saturar la cantidad de suelo de cada recipiente (ver Anexo G).

Imagen 2. Suelo saturado con diésel B10 (Izq.) y biodiésel (Der.)



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8. Volumen de contaminante a agregar en los recipientes plásticos con suelo

Recipiente	Volumen Diésel B10 (ml)	Recipiente	Volumen Biodiésel (ml)
LB-D1*	998	LB-B1*	1.605
LB-D2**	1.098	LB-B2**	1.605
D1.1	4.094	B1.1	4.691
D1.2	4.094	B1.2	4.815
D1.3	3.895	B1.3	4.815
D2.1	3.994	B2.1	4.691
D2.2	3.994	B2.2	4.938
D2.3	3.795	B2.3	4.691

Fuente: Elaboración propia

(*),(**). Línea base (primera y segunda repetición): Contiene suelo y contaminante, pero no se le aplica la tecnología OSE II.

- Se mezcla el suelo con el contaminante, hasta obtener una muestra homogénea y uniforme. (Imagen 3).

4.3.4 Aplicación de la tecnología OSE II. El cálculo de la dosificación de OSE II se realiza después de cuantificar la cantidad de grasas y aceites presentes en cada muestra de suelo contaminado, para esto, es necesario realizar un muestreo para analizar esta concentración inicial. Se debe tener en cuenta que se van a manejar tres tipos de dosificación en la evaluación. El procedimiento se realizó de la siguiente manera:

Imagen 3. Distribución de los recipientes del suelo contaminado con diésel y biodiésel



Fuente: Elaboración propia

1. Se toman muestras de todos los recipientes para conocer la cantidad de grasas y aceites con la que se inicia la evaluación.
2. Se envían las muestras al laboratorio HIDROLAB, (500 g de suelo a solicitud del mismo). Los resultados obtenidos presentados en la tabla 20 indican cuál es la cantidad de grasas y aceites en cada muestra.

Tabla 20. Resultados de Grasas y Aceites iniciales (t0)

Recipiente	%G&A	Recipiente	%G&A
LB-D1	27,44	LB-B1	28,45
LB-D2	24,08	LB-B2	29,28
D1.1	24,71	B1.1	28,93
D1.2	23,05	B1.2	29,16
D1.3	26,20	B1.3	25,95
D2.1	24,91	B2.1	27,34
D2.2	26,14	B2.2	29,70
D2.3	26,23	B2.3	30,30

Fuente: Elaboración propia. (Anexo H)

3. Conocidos estos resultados, se procede a calcular cuál es volumen contaminado con grasas y aceites en la mezcla total, a partir de la ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo del volumen de suelo contaminado con grasas y aceites

$$V_{\text{suelo contaminado}} = V_{\text{total suelo}} * \%G\&A$$

Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

Donde:

$V_{\text{Suelo contaminado}}$: Corresponde al volumen de suelo contaminado

$V_{\text{Total del suelo}}$: Corresponde al volumen del suelo más el contaminante

$\%G\&A$: Porcentaje de grasas y aceites

En la tabla 21, se presentan los datos obtenidos mediante la ecuación anteriormente mencionada.

Debido a que estos cálculos son para la dosificación de la tecnología OSE II, las muestras de líneas bases (LB-D1, LB-D2, LB-B1 y LB-B2) se toman como muestra blanco (no se aplica el proceso de biorremediación), con el fin de al finalizar el experimento observar cuánto disminuye su porcentaje de contaminación sin hacerse ningún tipo de tratamiento.

Tabla 21. Volumen contaminado con grasas y aceites de cada muestra

Recipiente	Volumen contaminado (L)	Recipiente	Volumen contaminado (L)
D1.1	2,28	B1.1	3,04
D1.2	2,28	B1.2	3,16
D1.3	2,34	B1.3	2,73
D2.1	2,47	B2.1	2,79
D2.2	2,42	B2.2	3,22
D2.3	2,34	B2.3	3,09

Fuente: Elaboración propia. (Anexo H)

4. Luego, para calcular la dosificación correspondiente a cada muestra contaminada, debe tenerse en cuenta la rotulación de cada recipiente para dosificar correctamente, es decir:

- La dosificación 1, corresponde a la relación 1:25, por tanto, 1 unidad volumétrica de OSE II, remedia 25 unidades volumétricas de contaminante.
- La dosificación 2, corresponde a la relación 1:37,5, por tanto, 1 unidad volumétrica de OSE II, remedia 37.5 unidades volumétricas de contaminante.
- La dosificación 3, corresponde a la relación 1:50, por tanto, 1 unidad volumétrica de OSE II, remedia 50 unidades volumétricas de contaminante.

En la siguiente tabla se presenta el volumen de OSE II que se debe aplicarse en cada muestra.

Tabla 22. Volumen de la tecnología OSE II a utilizar en cada muestra

Recipiente	Volumen OSE II (ml)	Recipiente	Volumen OSE II (ml)
D1.1	91,39	B1.1	121,83
D1.2	60,78	B1.2	84,34
D1.3	46,81	B1.3	54,64
D2.1	98,73	B2.1	111,77
D2.2	64,47	B2.2	85,88
D2.3	46,85	B2.3	161,86

Fuente: Elaboración propia. (Anexo H)

5. Seguido del cálculo del volumen a utilizar de la tecnología OSE II, se determina el volumen de agua que se debe emplear para la mezcla. En el manual de la tecnología OSE II, se establece que cada 1 unidad volumétrica de OSE II se debe mezclar con 50 unidades volumétricas de agua; en la tabla 23 se presenta el volumen necesario a utilizar en cada muestra.

El agua que se debe emplear no puede ser agua potable o del acueducto, ya que esta contiene cloro cuando procede de una planta de tratamiento. Esto hace que el crecimiento bacteriano sea lento o nulo debido a que el cloro destruye la pared de las células de las bacterias, concluyendo las funciones vitales, lo que produce la muerte del microorganismo.⁷⁰

Tabla 23. Volumen de Agua a utilizar en cada muestra

Recipiente	Volumen Agua (ml)	Recipiente	Volumen Agua (ml)
D1.1	4.569,43	B1.1	6.091,36
D1.2	3.039,18	B1.2	4.217,13
D1.3	2.340,38	B1.3	2.731,93
D2.1	4.936,50	B2.1	5.588,72
D2.2	3.223,48	B2.2	4.294,16
D2.3	2.342,86	B2.3	3.092,81

Fuente: Elaboración propia. (Anexo H)

Es por esto que se recomienda, en el manual de OSE I, que se utilice agua de la zona (ríos, lagos, jagüey, estanques, aljibes, entre otros); el agua utilizada en el experimento proviene de aljibes, ya que estos se tienen como fuente alterna al agua potable.

- Una vez se conoce el volumen de la tecnología OSE II y agua que necesita cada muestra, se realiza la mezcla de estos y se aplica con ayuda de una bomba pulverizadora, como se aprecia en la imagen 4.

Imagen 4. Bomba pulverizadora con mezcla de OSE II y Agua



Fuente: Elaboración propia

⁷⁰ CHRISTMAN, Keith. Cloro. [En Línea]. Recuperado en 2019-08-17. Disponible en: <https://www.eird.org/estrategias/pdf/spa/doc14585/doc1485.pdf>

Durante y después de la aplicación de la mezcla de OSE II y agua en las muestras se agita el suelo para garantizar que la solución quede distribuida en todo el recipiente (Ver imagen 5).

Imagen 5. Aplicación de la mezcla de OSE II y Agua, a una muestra



Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Volteo y toma de muestras. Para verificar lo que ocurre con la concentración de grasas y aceites en cada muestra, se realiza un muestreo semanal (cada 7 días) durante 28 días, tiempo en el cual se le realiza a cada tratamiento un volteo manual diario por aproximadamente 1 minuto para garantizar la humedad y aireación en todo el suelo. El seguimiento fotográfico de todas las muestras se presentan en el anexo I.

Las muestras son enviadas al laboratorio HIDROLAB, el cual se encarga de entregar los análisis correspondientes a la concentración de grasas y aceites de cada tratamiento.

Se realiza un muestreo de suelo simple⁷¹, ya que la muestra obtenida se toma de una sola extracción o de un solo recipiente; y es un muestreo de identificación⁷², ya que el objetivo de esta es investigar la existencia de contaminación de grasas y aceites en el suelo a través de muestras representativas de cada tratamiento con el fin de establecer si el suelo cumple o no con los estándares de la norma Louisiana 29B.

⁷¹ MENDOZA, Reynaldo. & ESPINOZA, Ariel. Guía técnica para muestreo de suelos. En: Planificación para el muestreo de suelos. 2017. [En línea]. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: <http://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>

⁷² MINISTERIO DEL AMBIENTE DE PERÚ. Guía para el muestreo de suelos. En: Plan de muestreo. 2014. [En línea]. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>

Para esto, se debe realizar el siguiente procedimiento, con el fin de que todas las muestras tengan las mismas características en cuanto a la toma de las mismas; este se describe a continuación.

- a. Se debe homogeneizar la muestra que se encuentra en el recipiente, esto con ayuda de un tubo plástico el cual cumple la función de agitador con el fin de mezclar las fases (suelo, contaminante, agua y OSE II).
- b. Una vez el suelo se encuentre uniforme, se procede a tomar las muestras, (teniendo en cuenta que este muestreo es asistemático⁷³, es decir que no tiene un diseño especial en como se realiza la recolección) con ayuda de una pala de mano de jardinería, una báscula, bolsas de aluminio y ziploc de 1 Kg.
- c. De cada recipiente en tratamiento se toman aproximadamente 500 g de suelo (solicitado por el laboratorio HIDROLAB), el cual se vierte en la bolsa de aluminio y después en la bolsa ziploc.
- d. Posteriormente se rotula cada muestra, para identificación de cada una.
- e. El paso c) y d) se repiten para todos los tratamientos que requieren el análisis de laboratorio.
- f. Estas muestras se disponen en una nevera de poliestireno expandido (Icopor), a la cual se le agrega hielo para mantener refrigeradas hasta entregar al laboratorio.
- g. Las muestras deben entregarse junto con la cadena de custodia, en la cual se especifican datos como: lugar, fecha y hora de muestreo, tipo de contaminante e identificación de las muestras a analizar; el formato de la cadena de custodia se encuentra en el anexo J.

4.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.4.1 Resultados. Los resultados de laboratorio de la cuantificación de la concentración de grasas y aceites (saturadas: ácido palmítico, e insaturadas: ácido oleico) para cada muestra durante los días 0, 7, 14, 21, 28 se encuentran en el Anexo K. A continuación, se presentan las gráficas con sus respectivos cuadros, donde se evidencia el comportamiento de cada tratamiento (Tipo de contaminante – Dosificación de OSE II) en los 28 días de desarrollo experimental.

En el cuadro 9 y gráfica 2, se presentan los datos correspondientes a los suelos contaminados con diésel B10, de la primera y segunda repetición (D1.1 y D2.1), y contaminados con Biodiesel, de igual manera, de la primera y segunda repetición (B1.1 y B2.1), tratados con la dosificación 1:25.

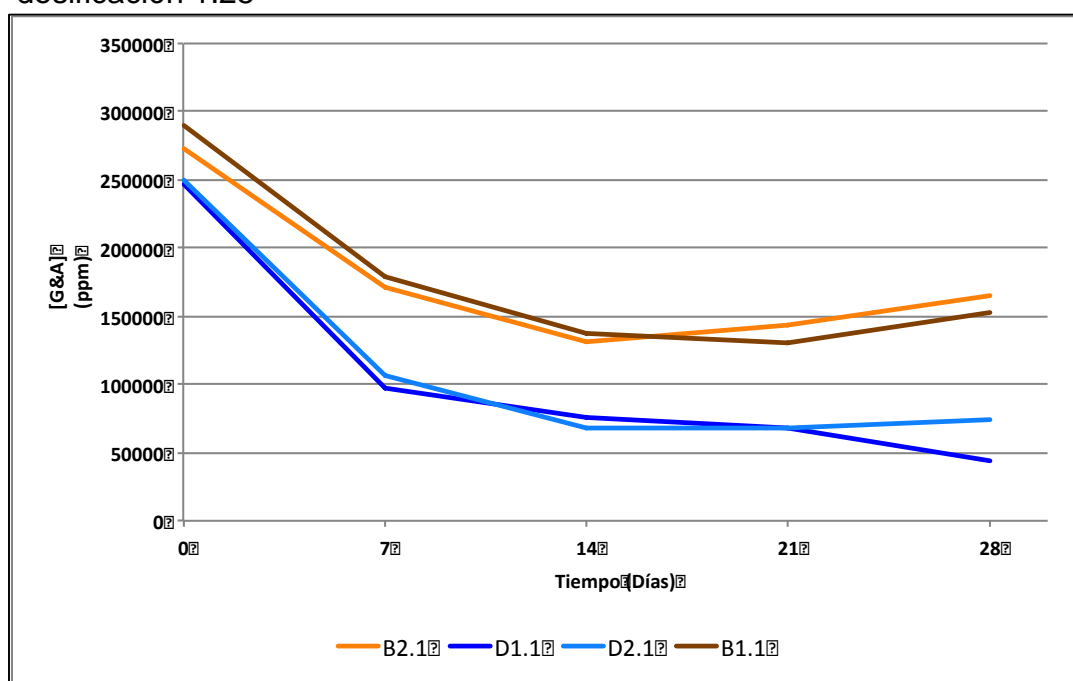
⁷³ ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROPECUARIA CERRO AZUL. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos. En: Tipo y cantidad de muestra a tomar. 2012. [En línea]. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-tnicas_de_toma_y_remisin_de_muestras_de_suelos.pdf

Cuadro 9. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:25

Dosificación	1:25			
Contaminante	DIÉSEL B10		BIODIÉSEL	
Tiempo (días)	G&A (ppm)	G&A (ppm)	G&A (ppm)	G&A (ppm)
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2
0	247.069	249.122	289.348	273.468
7	96.696	106.308	178.298	171.781
14	75.096	67.894	137.279	130.838
21	67.675	67.735	130.425	143.964
28	44.062	73.763	153.103	165.690

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:25



Fuente: Elaboración propia

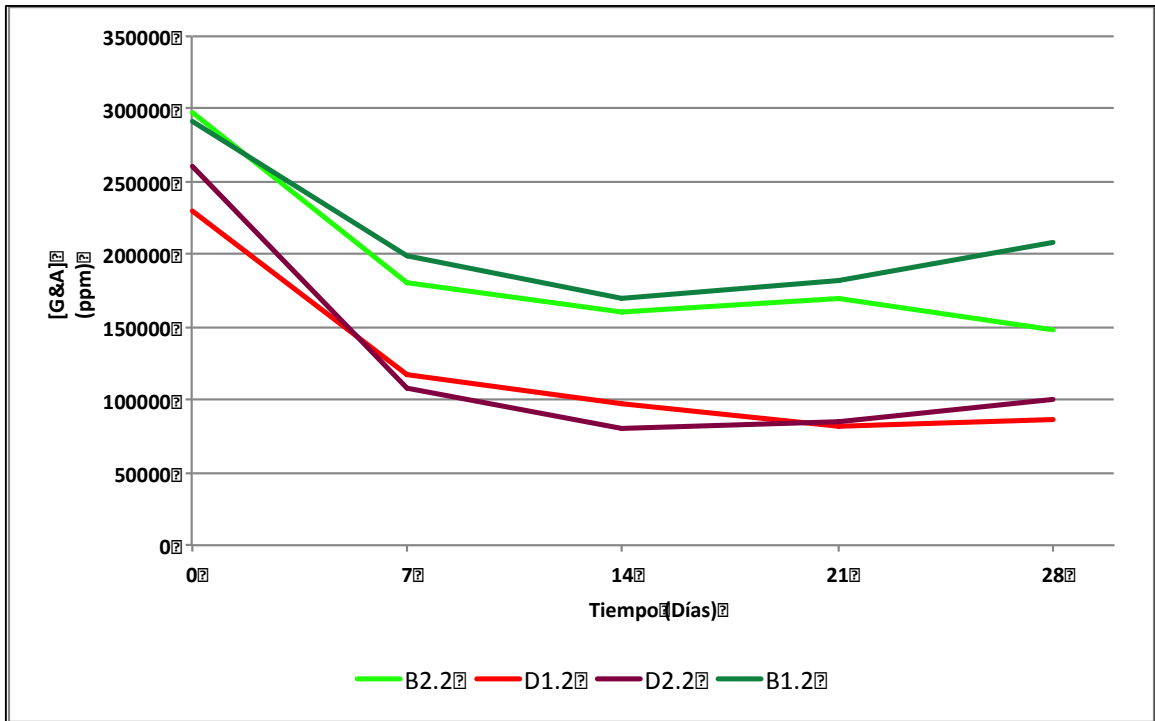
El cuadro 10 y gráfica 3, corresponden a la concentración de grasas y aceites del suelo contaminado con diésel B10 (1ª y 2ª repetición) y con biodiésel (1ª y 2ª repetición), tratados con la dosificación 1 : 37,5.

Cuadro 10. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:37,5

Dosificación	1:37,5			
Contaminante	DIÉSEL B10		BIODIÉSEL	
Tiempo (días)	G&A (ppm)	G&A (ppm)	G&A (ppm)	G&A (ppm)
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2
0	230.519	261.360	291.642	296.969
7	117.018	108.634	199.726	179.814
14	96.586	80.309	169.756	161.133
21	81.809	85.457	181.555	169.293
28	86.802	99.963	207.583	148.107

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:37,5



Fuente: Elaboración propia

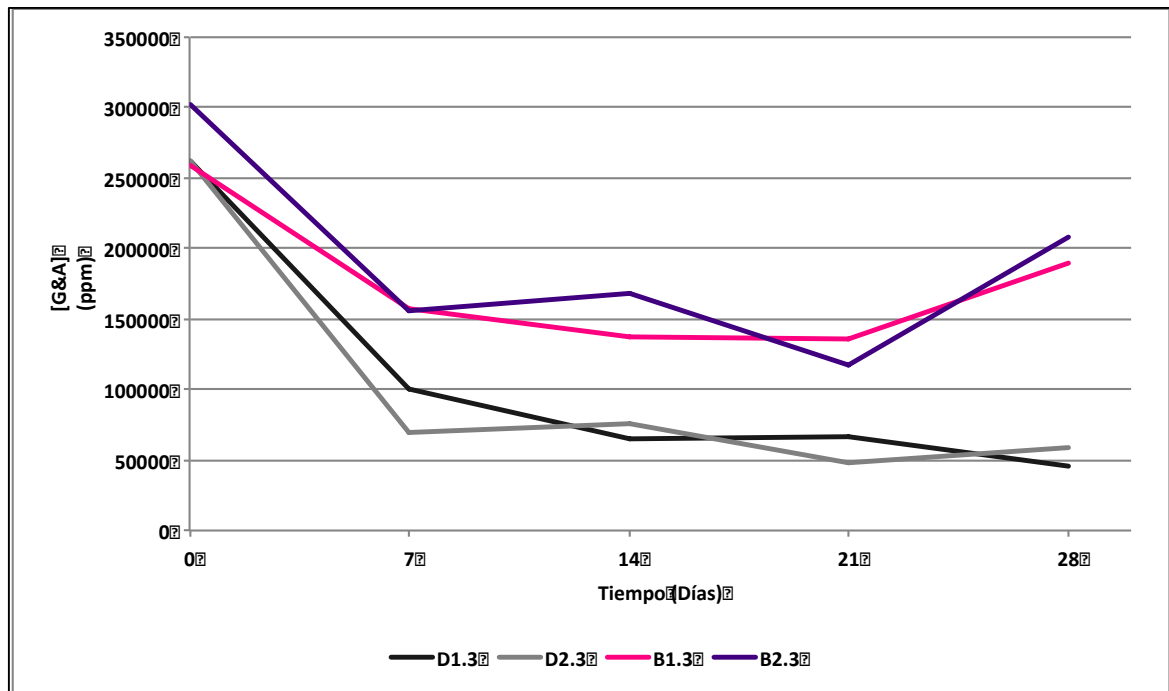
Por último en el cuadro 11 y gráfica 4, se presentan los datos correspondientes a los suelos contaminados con diésel B10, de la primera y segunda repetición (D1.3 y D2.3), y contaminados con Biodiesel, de igual manera, de la primera y segunda repetición (B1.3 y B2.3), tratados con la dosificación 1:50.

Cuadro 11. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:50

Dosificación	1:50			
Contaminante	DIÉSEL B10		BIODIÉSEL	
Tiempo (días)	G&A (ppm)	G&A (ppm)	G&A (ppm)	G&A (ppm)
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 1	Repetición 2
0	262.047	262.324	259.541	303.008
7	99.771	69.077	158.031	156.360
14	64.994	75.159	137.585	168.165
21	66.497	47.990	135.235	116.733
28	45.670	58.439	189.814	208.194

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4. Concentración de grasas y aceites de suelos tratados con la dosificación 1:50



Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los resultados de manera gráfica acorde a las dosificaciones trabajadas, se calcula el porcentaje de reducción (Cuadro 12) que se obtuvo al día 28 de cada muestra (Cálculos en el Anexo L), tomando como referencia el día cero.

Cuadro 12. Porcentaje de reducción de grasas y aceites del día 0 al día 28

Contaminante	Repetición	Dosificación	Muestra	% Reducción
Diésel B10	Primera	1:25	D1.1	82
		1:37,5	D1.2	62
		1:50	D1.3	83
	Segunda	1:25	D2.1	70
		1:37,5	D2.2	62
		1:50	D2.3	78
Biodiésel	Primera	1:25	B1.1	47
		1:37,5	B1.2	29
		1:50	B1.3	27
	Segunda	1:25	B2.1	39
		1:37,5	B2.2	50
		1:50	B2.3	31

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que para los suelos contaminados con diésel B10, la dosificación que permite una mayor reducción de grasas y aceites en 28 días es la relación 1:50, tanto en la primera como en la segunda repetición; ya que se obtiene una reducción del 86% y 78%, respectivamente; y para suelos contaminados con biodiésel, la dosificación que permite una mayor reducción de grasas y aceites, es 1:25 y 1:37,5, para la primera y segunda repetición, respectivamente, obteniendo una reducción de 47% y 50% con respecto a la concentración inicial.

4.4.2 Análisis de varianza. El análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) permite conocer el efecto del factor α (Dosificación), el factor β (Tipo de contaminante) y la interacción de los factores ($\alpha\beta$), en la concentración de grasas y aceites del suelo.

Debido a que se realizó un seguimiento cada 7 días durante 28 días, se presenta un análisis de varianza para cada tiempo (es decir, 7, 14, 21 y 28 días), con el fin de observar qué factores tienen influencia en la concentración de grasas y aceites, a medida que va aumentando el tiempo, desde que se aplicó la tecnología OSE II.

Por tanto, en la tabla 24 se presentan los datos de solución del análisis de varianza, una vez se aplican las fórmulas del diseño de experimentos factorial (Ver Anexo M).

Para realizar el análisis de varianza, es necesario identificar los valores del estadístico de prueba para cada factor (F_0) como para la interacción, al igual que el estadístico de prueba que se encuentra en tablas o también conocido como $F_{\text{Crítico}}$. Esto se realiza con el fin de tomar una decisión por medio de la prueba de hipótesis, la cual establece que:

Si $F_o > F_{\text{Crítico}}$; entonces se rechaza H_o .

Tabla 24. ANOVA diseño factorial 3x2 para la disminución de la concentración de G&A

ANOVA para 7 días de seguimiento						
Fuente de Variación	SC	GL	MC	F_o	P	$F_{\text{Crítico}}$
Dosificación (α)	$1,87 \times 10^9$	2	$9,36 \times 10^8$	7,26	0,02	5,14
Contaminante (β)	$1,66 \times 10^{10}$	1	$1,66 \times 10^{10}$	128,91	$2,80 \times 10^{-5}$	5,99
Interacción ($\alpha\beta$)	$9,87 \times 10^6$	2	$4,93 \times 10^6$	0,04	0,96	5,14
Error	$7,73 \times 10^8$	6	$1,29 \times 10^8$			
Total	$1,93 \times 10^{10}$	11				
ANOVA para 14 días de seguimiento						
Dosificación (α)	$1,20 \times 10^9$	2	$5,99 \times 10^8$	4,89	0,05	5,14
Contaminante (β)	$1,65 \times 10^{10}$	1	$1,65 \times 10^{10}$	134,44	$2,48 \times 10^{-5}$	5,99
Interacción ($\alpha\beta$)	$2,17 \times 10^8$	2	$1,09 \times 10^8$	0,89	0,46	5,14
Error	$7,36 \times 10^8$	6	$1,23 \times 10^8$			
Total	$1,86 \times 10^{10}$	11				
ANOVA para 21 días de seguimiento						
Dosificación (α)	305×10^9	2	$1,53 \times 10^9$	17,74	$3,03 \times 10^{-3}$	5,14
Contaminante (β)	$1,76 \times 10^{10}$	1	$1,76 \times 10^{10}$	205,11	$7,25 \times 10^{-6}$	5,99
Interacción ($\alpha\beta$)	$3,43 \times 10^8$	2	$1,72 \times 10^8$	2,00	0,22	5,14
Error	$5,16 \times 10^8$	6	$8,60 \times 10^7$			
Total	$2,15 \times 10^{10}$	11				
ANOVA para 28 días de seguimiento						
Dosificación (α)	$1,43 \times 10^9$	2	$7,13 \times 10^8$	1,63	0,27	5,14
Contaminante (β)	$3,67 \times 10^{10}$	1	$3,67 \times 10^{10}$	83,90	$9,53 \times 10^{-5}$	5,99
Interacción ($\alpha\beta$)	$2,11 \times 10^9$	2	$1,05 \times 10^9$	2,41	0,17	5,14
Error	$2,63 \times 10^9$	6	$4,38 \times 10^8$			
Total	$4,29 \times 10^{10}$	11				

Fuente: Elaboración propia

Dicho lo anterior, es importante resaltar que el $F_{\text{Crítico}}$ se encuentra en tablas, y se busca dependiendo del nivel de significancia, los grados de libertad del factor

involucrado y el error. El nivel de significancia seleccionado es de 0,05, ya que es el valor teórico recomendado y en él se tiene en cuenta la probabilidad de cometer errores en el experimento; los grados de libertad son 2, 1 y 2, para el factor α , factor β y la interacción $\alpha\beta$, respectivamente; y por último el error es igual a 6, para todas las pruebas de hipótesis planteadas.

A continuación se presentan los valores para $F_{\text{Crítico}}$, con un nivel de confiabilidad del 95%.

Para el factor α → $F_{0,05;2;6} = 5,14$

Para el factor β → $F_{0,05;1;6} = 5,99$

Para la interacción $\alpha\beta$ → $F_{0,05;2;6} = 5,14$

Con esto se puede establecer qué factor tiene efecto en la concentración de grasas y aceites, mediante la aceptación o rechazo de la hipótesis nula, como se observa en el cuadro 13.

Cuadro 13. Interpretación con la prueba de hipótesis

	Seguimiento			
	7 días	14 días	21 días	28 días
Factor Dosificación (α)	Si hay efecto	No hay efecto	Si hay efecto	No hay efecto
Factor Contaminante (β)	Si hay efecto	Si hay efecto	Si hay efecto	Si hay efecto
Interacción de factores ($\alpha\beta$)	No hay efecto	No hay efecto	No hay efecto	No hay efecto

Fuente: Elaboración propia

- ANOVA para 7 y 21 días de seguimiento: Se observa que la interacción entre el tipo de contaminante y la dosificación no tiene efecto sobre la concentración de grasas y aceites; sin embargo, estos factores sí afectan la variable respuesta de manera independiente, es decir, sí existe efecto de la dosificación en la concentración de grasas y aceites, ya que los valores entre los niveles son diferentes, al igual que hay efecto del tipo de contaminante, encontrando concentraciones diferentes de grasas y aceites para cada tipo de combustible.
- ANOVA para 14 y 28 días de seguimiento: Se puede contemplar que la interacción entre el tipo de contaminante y la dosificación no tiene efecto sobre la concentración de grasas y aceites; sin embargo, sí existe efecto del tipo de contaminante, encontrando concentraciones diferentes de grasas y aceites para cada tipo de combustible, pero sin obtener una influencia por las dosificaciones planteadas sobre la variable de respuesta.

La conclusión del diseño factorial, de manera general, radica en que sí hay efecto del tipo de contaminante, debido a la concentración de grasas y aceites que cada uno presenta por el método de cuantificación (SM 5520 E), pero la interacción de los dos factores no afecta la variable de respuesta. Sin embargo, el comportamiento alterno de la dosificación a lo largo del experimento permite inferir que esta sí influye en la concentración de grasas y aceites, y que la variabilidad que presenta se centra en el error experimental humano a la hora de tomar las muestras o analizar las mismas.

4.4.3 Análisis de resultados. Las grasas y aceites son moléculas compuestas de triglicéridos que a su vez se componen de tres ácidos grasos adheridos a una molécula de glicerol, formando una estructura molecular denominada éster. La diferencia entre grasa y aceite radica en el estado en el que se encuentra a temperatura ambiente, es decir, las grasas se comportan como semi-sólidos y los aceites como líquidos, esto se debe a la forma de unión de los triglicéridos, si estos se pueden unir, como es el caso de los ácidos grasos saturados y forman una estructura cristalina se produce una grasa sólida, y si la mayor parte de los ácidos grasos forman cadenas curvas, como los ácidos grasos insaturados, producen un aceite ya que no pueden aglutinarse.⁷⁴

Este contaminantes (G&A) cuando se encuentran en el suelo destruyen el humus y como consecuencia se ve afectada la fertilidad del suelo, además, al ocupar los poros del mismo se impide la aireación, no hay retención de agua y tampoco se almacenan los nutrientes necesarios para las plantas; asimismo, estas pueden filtrarse y llegar a contaminar aguas superficiales y subterráneas.

Tomando como referencia la composición del biodiésel y del diésel B10, el resultado esperado sería que la concentración de grasas y aceites en el biodiésel fuese mucho mayor que en el diésel B10, sin embargo, los resultados iniciales del laboratorio (tiempo cero) de cada muestra contaminada con diésel B10 y biodiésel presentan concentraciones de grasas y aceites en promedio de 25,21% y 28,57%, respectivamente, es decir, sus concentraciones son similares.

La respuesta a esta similitud está en que en el método de análisis (SM 5520-E), se cuantifican grupos de sustancias que poseen características físicas similares basadas en la solubilidad con el solvente; el diésel está compuesto mayormente por parafinas (aproximadamente un 75%) y estas presentan afinidad con el MTBE utilizado para arrastrar las grasas y aceites del suelo, por lo que al cuantificar la

⁷⁴ UNIVERSIDAD DE MARYLAND, COLLEGE PARK. Aceites y Grasas: Funciones y propiedades de las grasas y los aceites hidrogenados y su relación con los no hidrogenados. En: *Revista Palmas*. [En línea]. Washington: 1991, vol. (12), No. (4), p. 61-67. [Consultado: 25 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/300/300>

concentración de grasas y aceites en las muestras contaminadas con diésel B10, en los resultados de laboratorio también se está reportando la concentración de parafinas. A pesar de esto, la tecnología OSE II descompone la mayoría de sustancias orgánicas, por lo que hay una reducción tanto de grasas y aceites como de parafinas, esto se observa en los resultados de los laboratorios al realizar el seguimiento cada 7 días durante los 28 de tratamiento.

Ya que no se conoce propiamente el proceso de degradación de la tecnología OSE II, pero se sabe que es un multienzimático y estimula el crecimiento microbiano, se atribuye la descomposición de las cadenas de los componentes orgánicos a las enzimas presentes en la tecnología, facilitando a los microorganismos estos contaminantes en moléculas más pequeñas para su degradación.

Detallado el proceso de descomposición de las sustancias reportadas como grasas y aceites, se comprende por qué el comportamiento de reducción que presentan las muestras contaminadas con diésel B10 es más rápido que el de aquellas contaminadas con biodiésel; esto se debe a la complejidad de las moléculas presentes en cada combustible, es decir, el diésel B10 está compuesto mayormente por parafinas o hidrocarburos alcanos, por tanto estas moléculas poseen enlaces sencillos que se rompen más fácilmente durante el proceso de biodegradación, a diferencia del biodiésel, el cual se compone por ésteres metílicos de ácidos grasos (saturados e insaturados), por tanto, estas moléculas con enlaces dobles son más complejas para romper debido a que existe mayor fuerza entre los átomos del doble enlace.

A esto se atribuye que los suelos contaminados con diésel B10 disminuyan su concentración de grasas y aceites en un 73% (promedio de reducción de todas las muestras contaminadas con diésel B10 en el día 28), y los suelos contaminados con biodiésel disminuyan esta concentración en un 37% (promedio de reducción de todas las muestras contaminadas con biodiésel en el día 28).

Por otra parte, el comportamiento que tienen los resultados de grasas y aceites durante los 28 días de seguimiento, tiende a disminuir y a aumentar; esto puede ser consecuencia del error humano presentado en la toma de muestras, ya que se puede cometer la equivocación de no homogeneizar completamente la mezcla y por ende al tomar la muestra para realizar el análisis se puede tomar una porción que no representa en su totalidad lo que está ocurriendo en el recipiente.

Entrando a analizar las dosificaciones aplicadas para la remoción de grasas y aceites en los suelos de cada tratamiento del desarrollo experimental, se obtiene que para aquellas muestras contaminadas con diésel B10 la mejor relación de dosificación (entendiéndose como aquella que permite reducir en mayor cantidad la concentración de grasas y aceites) es 1 unidad volumétrica de OSE II por cada 50 unidades volumétricas de contaminante (1:50). Para el caso del biodiésel, la

mejor relación es aquella en donde hay mayor concentración de OSE II, es decir, cuando se reduce la proporción de dosificación estándar (1:50) en un 25% o 50%, de manera que las mejores relaciones son 1 unidad volumétrica de OSE II remedia 25 o 37,5 unidades volumétricas de contaminante (1:25 o 1:37,5), ya que al tener moléculas más complejas para descomponer se necesita una mayor cantidad de enzimas y microorganismos para degradar estas moléculas.

4.3.3 Análisis de los mejores escenarios. Ya que dentro del alcance del proyecto se encuentra la caracterización de los parámetros de la norma Louisiana 29B y el análisis físico para los mejores escenarios del desarrollo experimental, tomados como aquellos que tienen un mayor porcentaje de reducción en la concentración de grasas y aceites (cuadro 14), se realiza el análisis de parámetros de la norma Louisiana 29B para las muestras D1.3, D2.3, B1.1 y B2.2, y el análisis físico para las muestras D1.3 y B2.2, ya que estas presentaron mayor eficiencia, presentando el comparativo tanto con la norma mencionada como con los valores iniciales del suelo sin contaminar.

Cuadro 14. Mejores escenarios del desarrollo experimental con sus respectivos porcentajes de reducción en el día 28.

Diésel B10		Biodiésel	
Tratamiento	% Reducción	Tratamiento	% Reducción
D1.3	83	B1.1	47
D2.3	78	B2.2	50

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros a analizar son: Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo⁺⁶, Plomo, Mercurio, Selenio, Plata, Zinc, Conductividad eléctrica, Relación Absorción de Sodio (RAS), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PIS), pH, contenido de humedad, textura, densidad real y aparente y porosidad. Estos son los parámetros que se encuentran en la norma Louisiana 29B y el análisis físico, además de grasas y aceites e hidrocarburos totales del petróleo (TPH), pero estos últimos no se realizan en primer lugar, porque grasas y aceites es el parámetro de seguimiento y se ha evaluado durante los 28 días de experimentación, y por otro lado, no se realiza el análisis de TPH, ya que el método de cuantificación de grasas y aceites reportado por el laboratorio HIDROLAB (SM 5520-E), cuantifica tanto las grasas y aceites de origen animal y vegetal, como los hidrocarburos del petróleo, por tanto este parámetro (TPH) se excluye de la caracterización.

A continuación, en la Cuadro 15 se presentan los valores de los parámetros mencionados y las muestras catalogadas como mejores escenarios.

Cuadro 15. Parámetros de la norma Louisiana 29B y caracterización física para las muestras D1.3, D2.3, B1.1 y B2.2

Parámetro	Norma Louisiana 29B	Suelo sin contaminar (SSC)	Valor D1.3	Valor D2.3	Valor B1.1	Valor B2.2
Arsénico (mg/Kg)	10	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Bario (mg/Kg)	20.000	19,32	8,76	8,6	7,98	6,77
Cadmio (mg/Kg)	10	0,121	<0,025	<0,025	<0,025	<0,025
Cromo ⁺⁶ (mg/Kg)	500	6,97	4,87	4,7	3,79	2,99
Plomo (mg/Kg)	500	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Mercurio (mg/Kg)	10	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Selenio (mg/Kg)	10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Plata (mg/Kg)	200	<1,25	<1,25	<1,25	<1,25	<1,25
Zinc (mg/Kg)	500	22	14,8	13,4	11,4	10,6
Conductividad eléctrica (dS/m)	<4	0,19	0,09	0,10	0,41	0,28
Relación absorción de sodio (RAS)	<12	0,28	1,43	1,13	0,13	0,09
Porcentaje de sodio intercambiable (PIS) – (%)	<15	1,38	6,31	18	13,10	24,36
pH	6 a 9	7	7	7	7	7
Contenido de Humedad (%)	<50	32,41	94,06	-	-	49,80
Textura	NA	Limosa	Arcillo Limosa	-	-	Franco Limosa
% Arena	NA	6	2	-	-	36
% Limo	NA	88	49	-	-	64
% Arcilla	NA	6	49	-	-	0
Densidad real (g/cm ³)	NA	1,56	1,19	-	-	1,13
Densidad aparente (g/cm ³)	NA	0,79	0,62	-	-	0,7
Porosidad (%)	NA	49	48	-	-	38

Fuente: Resultados del laboratorio INGELAB e HIDROLAB. Ver Anexo E.
 NA: No Aplica; Parámetros no contemplados por la norma Louisiana 29B.

En el siguiente cuadro, se realiza la interpretación de los parámetros de cada muestra con respecto a la norma y el suelo sin contaminar.

Cuadro 16. Interpretación de los datos obtenidos en el cuadro 15, de los parámetros

Parámetro	¿Cumple con la norma?				Comentario con respecto al suelo sin contaminar			
	D1.3	D2.3	B1.1	B2.2	D1.3	D2.3	B1.1	B2.2
Arsénico (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene
Bario (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Cadmio (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Cromo⁺⁶ (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Plomo (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene
Mercurio (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene
Selenio (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene
Plata (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene
Zinc (mg/Kg)	Si	Si	Si	Si	Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Conductividad eléctrica (dS/m)	Si	Si	Si	Si	Disminuye	Disminuye	Aumenta	Aumenta
Relación absorción de sodio (RAS)	Si	Si	Si	Si	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Disminuye
pH	Si	Si	Si	Si	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene	Se mantiene
Porcentaje de sodio intercambiable (PIS)	Si	No	Si	No	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta

Fuente: Elaboración propia

En la norma se encuentran diferentes metales pesados (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo⁺⁶, Plomo, Mercurio, Selenio, Plata y Zinc), que al ser analizados en el suelo sin contaminar, no son apreciables ya que no se encuentran cercanos a los límites legales, y una vez se aplica la tecnología OSE II los valores de estos parámetros disminuyen a valores mucho menores a los que se encontraba el suelo sin contaminar, o se mantiene el valor del parámetro, pero siempre por debajo del límite estipulado por la norma. Es importante resaltar que la presencia de metales pesados tanto en el ambiente como en los alimentos puede causar intoxicaciones con daños irreparables en la salud humana o animal; además si se presentan altas

concentraciones de estos metales en organismos de seres vivos, se pueden alterar procesos bioquímicos y fisiológicos causando patologías.⁷⁵

Otro de los parámetros evaluados es la conductividad eléctrica, la cual se refiere a la salinidad presente en el suelo, por tanto a mayor conductividad eléctrica, mayor es la salinidad del suelo; sin embargo, este es un fenómeno indeseable en el suelo, ya que afecta el crecimiento de las plantas porque no existe asimilación de nutrientes y de igual manera afecta la actividad microbiana⁷⁶. En los cuatro escenarios evaluados, la conductividad eléctrica se encuentra por debajo del límite permisible por la norma Louisiana 29B, y al comparar estos valores con respecto al suelo sin contaminar, se aprecia una disminución de esta conductividad en las muestras de suelos contaminados con diésel B10, y un aumento (no significativo) para las muestras contaminadas con biodiésel.

De la mano de la conductividad eléctrica, se encuentra la relación de absorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PIS), los cuales son parámetros que se encargan de medir la concentración de sodio presente en el suelo; y un exceso de sodio provoca el deterioro de las propiedades físicas y químicas del suelo, impactando en el rendimiento de los cultivos, ya que afecta tanto la estructura como la permeabilidad.⁷⁷ Estos parámetros se encuentran dentro de los límites permisibles por la norma, a excepción de la muestra D2.3 y B2.2 con el parámetro PIS, lo que indica que al tener un porcentaje de aproximadamente 18% y 24,36%, respectivamente, se cuenta con un suelo moderado y fuertemente sódico⁷⁸; esto puede ser causa de la descomposición de los contaminantes y reacciones que pueden ocurrir en la mezcla, para obtener sales que aumenten el valor de los parámetros mencionados; y como solución se plantea corregir los suelos con ayuda de fertilizantes para que posteriormente puedan ser utilizados.

Por último, el pH se mantiene una vez se aplica la tecnología OSE II, y tiende a neutralizarse, obteniendo un suelo en el que la actividad microbiana es ideal ya

⁷⁵ LONDOÑO, Luis & LONDOÑO, Paula & MUÑOZ, Fabián. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. En: *Bioteología en el sector agropecuario e industrial*. [En Línea]. Universidad de Cauca: Julio – Diciembre, 2016, vol. (14), No. (2), p. 145-153. [Consultado de: 20 de septiembre de 2019]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>

⁷⁶ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. El manejo de suelos afectados por salinidad. (s.f.). [En Línea]. Recuperado en 2019-09-20. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-afectados-por-salinidad/es/>

⁷⁷ JASCHEK, Jimena. Medidas de sodicidad: RAS y PSI. 2016. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-25. Disponible en: <https://www.tiloom.com/medidas-de-sodicidad-ras-y-psi/>

⁷⁸ CARROW, Robert & DUNCAN, Ronny. Best management practices for saline and sodic turfgrass sites. New York: CRC Press Taylor and Francis Group. 2012. 87 p. ISBN: 978-1-4398-1475-8 (eBook - PDF).

que se encuentran en un pH neutro y además hay una asimilación de nutrientes óptima para el desarrollo de las plantas.

En cuanto a los parámetros estipulados por la norma Louisiana 29B, se observa que la tecnología no tiene efectos negativos sobre estos, por el contrario, tiende a mantener o disminuir la concentración que presenta el suelo sin ningún tipo de contaminante; es decir, OSE II es una tecnología que no solo se compromete con la reducción de sustancias orgánicas (como grasas y aceites), sino que tampoco altera otros componentes del suelo.

Finalmente, se realiza el análisis físico, en el cual se contempla la textura del suelo, la densidad y la porosidad de este; y se observa que no hay una alteración significativa en cuanto a las densidades y la porosidad del suelo, ya que estas se mantienen, una vez hay efecto de la tecnología OSE II; sin embargo, en el caso inicial de la textura, el suelo sin contaminar presentaba una textura limosa, y al contaminar con diésel B10 y biodiésel, esta cambia a Arcillo Limosa y Franco Limosa, respectivamente.

Aunque aún hacen parte de la clase textural Limosa, este cambio de textura se centra en el aumento o disminución del tamaño de partícula, es decir, debido a la presencia de contaminante las partículas del suelo se acumulan formando una partícula con un diámetro mayor, o en el caso contrario, debido al volteo constante que se realiza a cada muestra en el recipiente, se destruyen las partículas grandes en partículas más pequeñas. Por tanto, a pesar de que es una propiedad que cambia en los dos escenarios presentados, el análisis se centra en la distribución que se tiene de las partículas del suelo (la arena tiene diámetro de partícula entre 2 y 0,05 mm, el limo está entre 0,05 y 0,002 mm, y la arcilla presenta diámetros menores a 0,002 mm)⁷⁹.

⁷⁹ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. [Sitio web]. FAO, Textura del suelo. [Consulta: 8 mayo 2019]. Disponible en:

http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

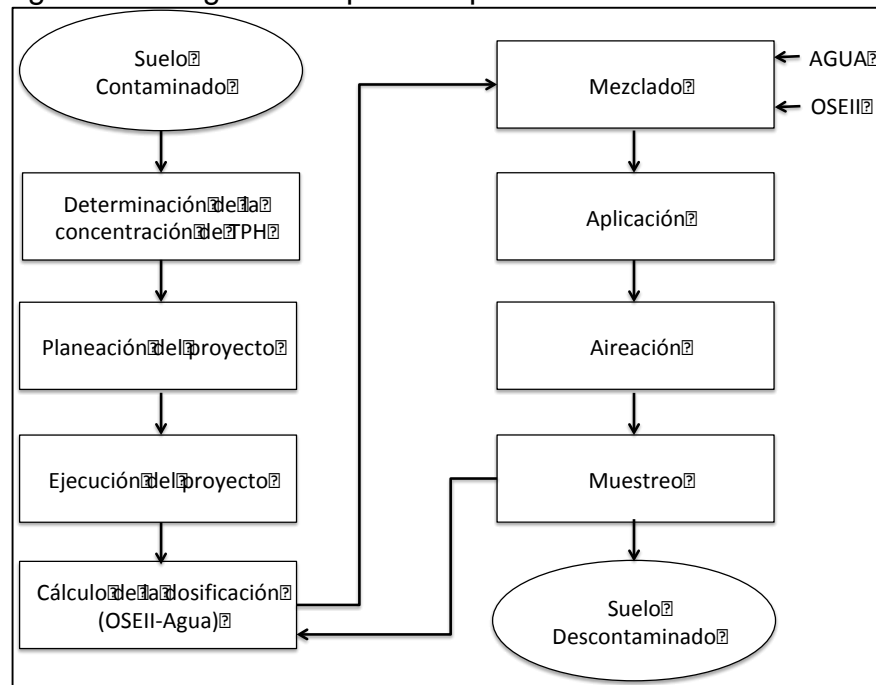
5. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO

Tomando como punto de partida las observaciones realizadas en el experimento y el análisis de resultados, en este capítulo se establecen los requerimientos técnicos para la biorremediación de un suelo contaminado con grasas y aceites aplicando la tecnología OSE II. Para dar contexto, se inicia con una breve descripción de la metodología acogida actualmente por EOM CONSULTING S.A.S para la descontaminación del suelo, se plantean propuestas que mejoran el control de variables en el proceso y se precisan los equipos requeridos.

5.1 PANORAMA ACTUAL EOM CONSULTING S.A.S

Como se ha mencionado, EOM CONSULTING S.A.S es una empresa dedicada a la descontaminación de agua y suelo afectados con hidrocarburos y sus derivados, ofreciendo soluciones ambientalmente responsables, dentro de ellos el uso de la tecnología OSE II, utilizada para reducir la concentración de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH). La figura 14 presenta el diagrama general del proceso para el tratamiento de un suelo contaminado.

Figura 14. Diagrama de proceso para la reducción de TPH en el suelo



Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

La operación inicia con la recopilación de la mayor cantidad de información posible de la zona afectada; tipo de contaminante, volumen derramado y gravedad API, matriz afectada, área y/o volumen de suelo contaminado, entre otros. En caso de no ser suministrada esta información elemental, EOM CONSULTING S.A.S realiza

estudios pertinentes para su determinación. A continuación se detalla cada una de las etapas del proceso de la figura 14.

- 1) Inicialmente, se hace un análisis de laboratorio para determinar la concentración de TPH en el suelo y se determina el volumen de suelo contaminado.
- 2) Acorde a la concentración obtenida de TPH en el suelo se realiza la planeación de las labores y elementos requeridos para la ejecución del proyecto (Maquinaria, personal, tiempo de ejecución, dosificación, materiales).
- 3) En la ejecución del proyecto se realiza la contratación y capacitación del personal, delimitación del área de trabajo y el montaje del sistema propuesto, de acuerdo al escenario establecido.
- 4) Obtenido el resultado de la concentración de TPH y con base a este, se realizan los respectivos cálculos de dosificación de OSE II y agua teniendo en cuenta las relaciones 1: 50 (1L de OSE II por cada 50L de contaminante) y 1: 50 (1L de OSE II por cada 50L de agua) implementadas en la empresa.
- 5) Se da inicio al proceso de mezclado de OSE II y agua. Generalmente, el agua para la mezcla es captada (por medio de una motobomba) de fuentes hídricas cercanas al lugar de ejecución de la prueba y almacenada en un bulk tank con capacidad de 1m³ (si es necesario, se emplea un tanque de armado rápido, fast tank (figura 15), de mayor capacidad). La dosificación de OSE II requerida se realiza en dispositivos de almacenamiento como bulk tank o fast tank.
- 6) Con el fin de homogeneizar la mezcla, se crea un circuito cerrado con la motobomba para permitir la continua entrada y salida de OSE II-agua al tanque.
- 7) Con ayuda de la bomba fumigadora y mediante una manguera empieza el proceso de aspersión de la mezcla sobre el suelo contaminado (ver figura 16).
- 8) Después de aplicar la mezcla, el proceso de aireación que requiere el tratamiento se puede realizar de distintas formas, teniendo en cuenta las condiciones del terreno a intervenir:
 - a) Se hace un montaje de red de tubería de PVC la cual puede ser instalada en terrenos donde no es posible el uso de maquinaria pesada o se requiere realizar la recirculación en medio acuoso, mediante la inyección de aire suministrado por un compresor.
 - b) Volteo mecánico con ayuda de retroexcavadoras (ver figura 16).
 - c) Volteo manual, se realiza con ayuda de herramienta menor efectuado por el personal auxiliar operativo (ej. palas).

La elección del método está condicionada al volumen de suelo a tratar, estabilidad del terreno, facilidad de acceso para las retroexcavadoras, entre otros; la aireación se hace continuamente durante los días que dure tratamiento.

Figura 15. Llenado de fast tank con agua suministrada por carro tanque



Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

- 9) Periódicamente, se realizan muestreos y análisis de laboratorio para cuantificar y hacer seguimiento de la reducción de la concentración de TPH en el suelo; esto hasta llegar al límite permisible estipulado en la norma Louisiana 29B (menor a 10.000 ppm ó 1%).

Si el seguimiento realizado en el punto 8 de la concentración de TPH no ha alcanzado el límite estipulado por la norma, se realiza una nueva dosificación acorde al último resultado obtenido por los análisis de laboratorio realizados; repitiendo así el procedimiento desde el punto 4 al 8, y así sucesivamente hasta alcanzar valores permisibles.

Como se ha mencionado, el objetivo de este proyecto es evaluar la reducción de otro tipo de contaminante con la tecnología OSE II diferente a TPH: grasas y aceites. Después de desarrollar la totalidad del experimento y analizar resultados, se plantean a continuación algunas propuestas que permitan mejorar y controlar adecuadamente el proceso.

5.2 PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN

Las propuestas presentadas en esta sección están soportadas por consideraciones que surgen en el desarrollo de la fase experimental del proyecto, teniendo en cuenta las condiciones propicias que requiere un proceso de biorremediación con la tecnología OSE II. Para ello, se identifican dificultades que se presentan y se plantean soluciones.

Dentro de las variables de mayor influencia en un proceso de biorremediación, y especialmente en la tecnología OSE II, se encuentra el contenido de humedad del suelo.

Figura 16. Proceso de aplicación de OSE II y aireación del suelo mediante montaje de red de tubería PVC (izq.) y proceso de aplicación de OSE II a través de bomba fumigadora y aireación del suelo mediante volteo mecánico por medio de excavadora (der.)



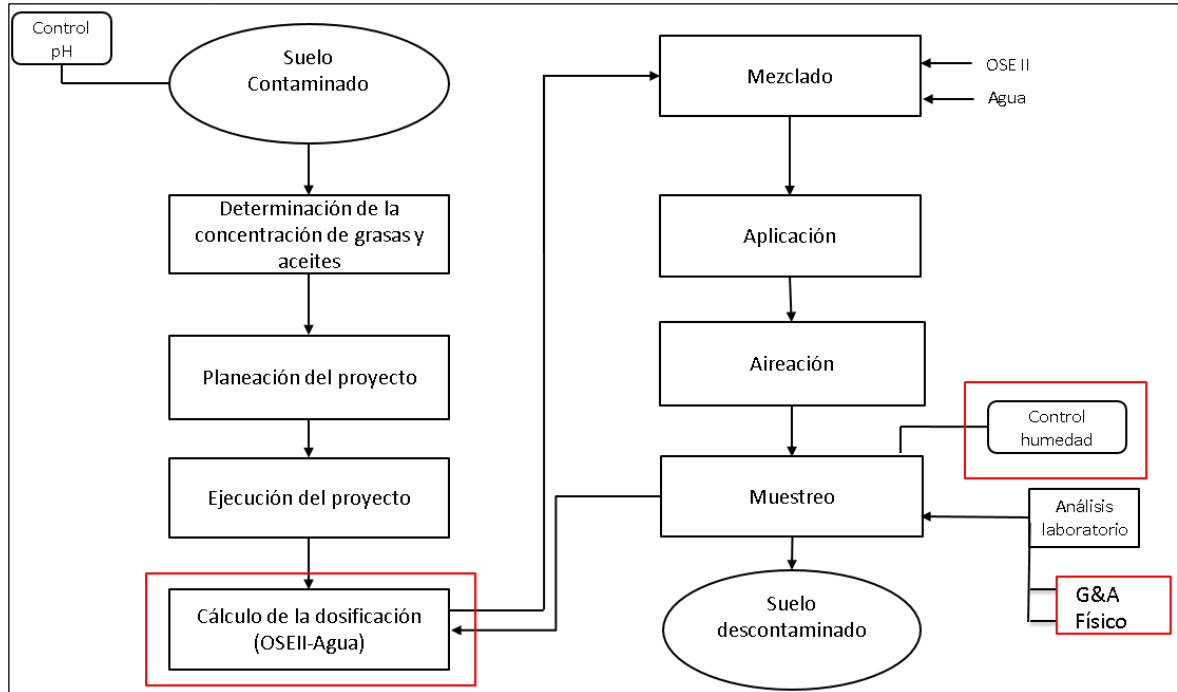
Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

Actualmente, en el servicio prestado por EOM CONSULTING S.A.S para tratar un suelo no se está controlando adecuadamente esta, por lo que las alternativas que serán planteadas en este capítulo giran en torno a dar un seguimiento y control pertinente a este parámetro. Por otra parte, se plantea una nueva dosificación de OSE II y tiempo de tratamiento con base a los resultados obtenidos experimentalmente, un análisis de los parámetros físicos más relevantes del suelo antes y después de aplicar la tecnología y, finalmente, tratar otro tipo de contaminante diferente a TPH: G&A.

A continuación, en la figura 17, se presenta la modificación del diagrama de proceso de EOM CONSULTING S.A.S estableciendo estas nuevas propuestas de implementación. Posteriormente se entrará en detalle para precisar en qué consiste cada una de ellas.

5.2.1 Análisis de parámetros físicos. Con el objetivo de asegurar que las propiedades físicas innatas del suelo a tratar no se vean afectadas al implementar la tecnología OSE II, se sugiere realizar análisis al inicio y final del tratamiento, comparar los resultados y reportar conclusiones acertadas. Además, para efectos de cálculo relacionados con la propuesta presentada para el control del contenido de humedad en el proceso, resulta fundamental conocer los parámetros físicos del suelo, específicamente la densidad aparente. Las propiedades físicas que se propone evaluar son las mismas que se analizaron en el suelo seleccionado para desarrollar la fase experimental de este proyecto; en la tabla 16 (Análisis físico del suelo a trabajar) de la sección 3.3.1 se mencionan estas.

Figura 17. Diagrama de proceso para la reducción de G&A en el suelo



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Control del contenido de humedad. Los microorganismos son los protagonistas en un proceso de biorremediación y requieren de condiciones mínimas para su crecimiento, y, al no contar el suelo con el contenido de humedad adecuado, se puede limitar de forma severa la biodegradación del contaminante: se presenta disminución de la actividad metabólica microbiana y una reducción en la tasa específica de crecimiento. Según lo reporta el manual de OSE II, durante el tratamiento, el contenido de humedad en el suelo siempre debe estar como mínimo en un 30%.

En el diseño de experimentos, como variable no controlable en el proceso de biorremediación se clasifica el contenido de humedad (sección 4.1.1.1); esto porque no es posible determinar la cantidad de agua que logra evaporarse durante el tratamiento ni la que resulta del metabolismo microbiano. Sin embargo, pueden realizarse mediciones para garantizar que el contenido de humedad no se encuentre por debajo del límite, y de ser así, corregirlo oportunamente.

Actualmente durante el tratamiento del suelo, esta variable no es controlada correctamente por EOM CONSULTING S.A.S, ya que si bien se agrega periódicamente agua al suelo (cuando tiene apariencia seca), no se hace un análisis previo que permita determinar cuál es el porcentaje de humedad y con base a este calcular la cantidad real de agua requerida para mantener el suelo en condiciones apropiadas. Con el propósito de hacer un seguimiento continuo del contenido de humedad durante el tratamiento, se plantea usar una balanza con

equipamiento completo, la cual bajo el principio del análisis gravimétrico determina el contenido de humedad de una gran variedad de productos, entre ellos el suelo. En el Cuadro 17 se describe el equipo.

La humedad del suelo es una relación (ecuación 6) expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo;

Ecuación 6. Contenido de humedad del suelo

$$W = \frac{W_w - W_s}{W_w} * 100\%$$

Fuente: CENTRO INTERNACIONAL DE MEJORAMIENTO DE MAÍZ Y TRIGO. Contenido de humedad del suelo: Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. México: CIMMYT, 2013. p. 3. Disponible en: <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/4030/98829.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Donde:

W: contenido de humedad expresado en porcentaje

Ww: peso de suelo húmedo

Ws: peso de suelo seco

Si el contenido de humedad del suelo se encuentra por debajo del 30%, la cantidad de agua que debe aplicarse para alcanzar esta condición mínima se calcula de la siguiente manera:

- 1) La balanza MB23 presenta como resultado el contenido de humedad del suelo (W) el cual está por debajo del 30%, y, el peso de la muestra a analizar (Ww) es conocido, por lo que a partir de la ecuación 6 se determina el peso de suelo seco (Ws).

Ecuación 7. Cálculo de peso del suelo seco

$$W_s = W_w (1 - W)$$

Fuente: Elaboración propia


Donde:

W: contenido de humedad del suelo por debajo del 30%

Ww: peso de la muestra a analizar

Ws: peso del suelo seco

Cuadro 17. Especificaciones técnicas balanza de humedad MB23

Balanza de humedad MB23		
	Capacidad x sensibilidad (g)	110 x 0,01g
	Fuente de calentamiento	Infrarroja
	Intervalo de temperatura	50- 160°C Incrementos de 5°C
	Resultados en pantalla	% Humedad % Sólidos Tiempo Temperatura Peso
	Porcentaje de lectura	0,1%
	Rango de humedad	0,1-100%
	Tiempo programable	1-99 min Incrementos de 30 a 60 seg.
	Dimensiones (L x A x H) cm	25 x 17 x 13
	Tipo de pantalla	LCD
	Dimensiones del platillo	9cm dia.
	Criterios de finalización	Automática, cronometrada o manual
	Alimentación eléctrica	110 VAC 50/60 Hz

Fuente: Tecnipesaje. Nit: 830.048.037-0. (28,10,2019). [Cotización: No. 2019-J24601].

- 2) Conocido W_s , se plantea el contenido de humedad de suelo deseado (W' : 30% o mayor) y, nuevamente mediante la ecuación 6 se determina el dato desconocido, en este caso W_w' .

Ecuación 8. Cálculo de peso del suelo húmedo, con humedad igual o mayor al 30%

$$W_w' = \frac{W_s}{1 - W'}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

W': contenido de humedad igual o mayor al 30%

Ws: peso del suelo seco

Ww': nuevo peso de la muestra humedad

- 3) A partir del peso de suelo húmedo para el contenido de humedad deseado (Ww') obtenido en el paso 2 y el peso de suelo seco (Ws) obtenido en el paso 1, se determina el peso de agua requerido para esta condición;

Ecuación 9. Peso de agua en suelo húmedo

$$W_{H_2O} = Ww' - Ws$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

W_{H₂O}: Peso del agua

Ww': nuevo peso de la muestra humedad

Ws: peso del suelo seco

- 4) Obtenida la cantidad de agua necesaria (W agua) para alcanzar el contenido de humedad deseado (W') en determinado peso de suelo seco (Ws), se plantea una relación para determinar la cantidad de agua total (V agua total) para agregar al volumen total de suelo que se está tratando (Vs total); la relación se hace en volumen y no en peso, por lo que debe hacerse la conversión de masa a volumen tanto del agua (W agua) como del suelo (Ws) utilizando sus respectivas densidades (para el caso de suelo se hace a partir de la densidad aparente), obteniéndose la siguiente ecuación 10:

$$V_{agua} \rightarrow Vs$$

$$V_{agua\ total} \rightarrow Vs\ total$$

Ecuación 10. Volumen total de agua requerida

$$V_{agua\ total} = \frac{V_{agua} * Vs\ total}{Vs}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

V_{agua total}: volumen de agua total

V_{agua}: volumen de agua obtenido

V_{s total}: volumen de suelo total en tratamiento

V_s: volumen de suelo analizado

5.2.3 Dosificación y tiempo de tratamiento. Para efectos de análisis de laboratorio, según lo estipula el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el aceite y la grasa están compuestos fundamentalmente de materia grasa de origen animal, vegetal y de hidrocarburos del petróleo⁸⁰. Tal y como se expuso en la sección de análisis de resultados (4.4.3), la concentración de grasas y aceites reportada para el biodiésel es de procedencia vegetal, y para el caso del diésel B10 es de origen vegetal e hidrocarburos del petróleo (en su mayoría parafinas).

En las tres dosificaciones aplicadas (1:25, 1:37,5 y 1:50), se observa que a los 28 días de tratamiento el porcentaje de remoción de grasas y aceites para el suelo que tenía como contaminante diésel B10 fue mayor que para el que tenía biodiésel, debido a la complejidad de las moléculas de este, lo que hace que su proceso de biodegradación sea más lento (ver sección 4.4.1). Las dosificaciones de mayor reducción fueron 1 unidad volumétrica de OSE II por cada 50 unidades volumétricas de contaminante (dosificación 3) y 1 unidad volumétrica de OSE II por cada 25 unidades volumétricas de contaminante (dosificación 1) para diésel B10 y biodiésel, respectivamente, obteniéndose que, para degradar grasas y aceites de origen vegetal se requiere de una mayor concentración de OSE II en la dosificación.

Para estas dosificaciones de mayor reducción, en los mejores escenarios (D1.3 y B1.1), la cantidad de contaminante necesario para saturar la muestra de suelo fue de 3895 ml y 4691 ml de diésel B10 y biodiésel, respectivamente, y, la cantidad de OSE II requerida para tratar estos volúmenes fue de 46 ml para el diésel B10 y 121 ml para el biodiésel. Partiendo de esta relación obtenida experimentalmente, se determina cuál es el volumen de contaminante que remedia una (1) unidad volumétrica de OSE II planteando lo siguiente:

$$\begin{aligned} 46 \text{ UV OSEII} &\rightarrow 3895 \text{ UV diésel B10} \\ 1 \text{ UV OSEII} &\rightarrow X \end{aligned}$$

Ecuación 11. Unidades volumétricas de diésel B10 remediadas por unidad volumétrica de OSE II

$$X = \frac{1 \text{ UV OSEII} * V_{\text{Diésel}}}{V_{\text{OSE II}}}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

⁸⁰ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Hidrocarburos (HC) en aguas por extracción Soxhlet líquido-líquido y gravimetría. Subdirección de Hidrología – Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. 2017. Cód: TP0155.

X: Unidades volumétricas de diésel que remedia 1 unidad volumétrica de OSE II

$V_{\text{diésel}}$: volumen de diésel agregado en la muestra D1.3

$V_{\text{OSE II}}$: volumen de OSE II agregado en la muestra D1.3

De esta manera, se obtiene que 1 unidad volumétrica de OSE II remedia aproximadamente 85 unidades volumétricas de diésel B10. Para el caso de biodiésel se realiza el mismo procedimiento y se obtiene la relación 1:39 (1 unidad volumétrica de OSE II por cada 39 unidades volumétricas de biodiésel).

Como se observa en la sección de resultados 4.4.1, los 28 días de tratamiento no fueron suficientes para reducir la concentración de grasas y aceites al límite que estipula la norma Louisiana 29B (menor a 10.000 ppm ó 1%), por lo que se realiza un análisis de regresión para modelar matemáticamente el comportamiento de las dosificaciones que presentaron el mayor porcentaje de reducción (dosificación 1 para biodiésel y dosificación 3 para diésel B10) y de este modo, estimar el tiempo de tratamiento necesario para dar cumplimiento a la norma, obteniéndose un total de 31 días de tratamiento para el diésel B10 (Ecuación 12) y 58 días para el biodiésel (Ecuación 13).

Ecuación 12. Estimación de la concentración de grasas y aceites de suelo contaminado con diésel B10 en función del tiempo

$$[G\&A] = 261581 - 35025t + 1994t^2 - 36.4t^3$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

[G&A]: concentración de grasas y aceites

t: tiempo en días

Ecuación 13. Estimación de la concentración de grasas y aceites de suelo contaminado con biodiésel en función del tiempo

$$[G\&A] = 288902 - 21034t + 852.9t^2 - 9.839t^3$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

[G&A]: concentración de grasas y aceites

t: tiempo en días

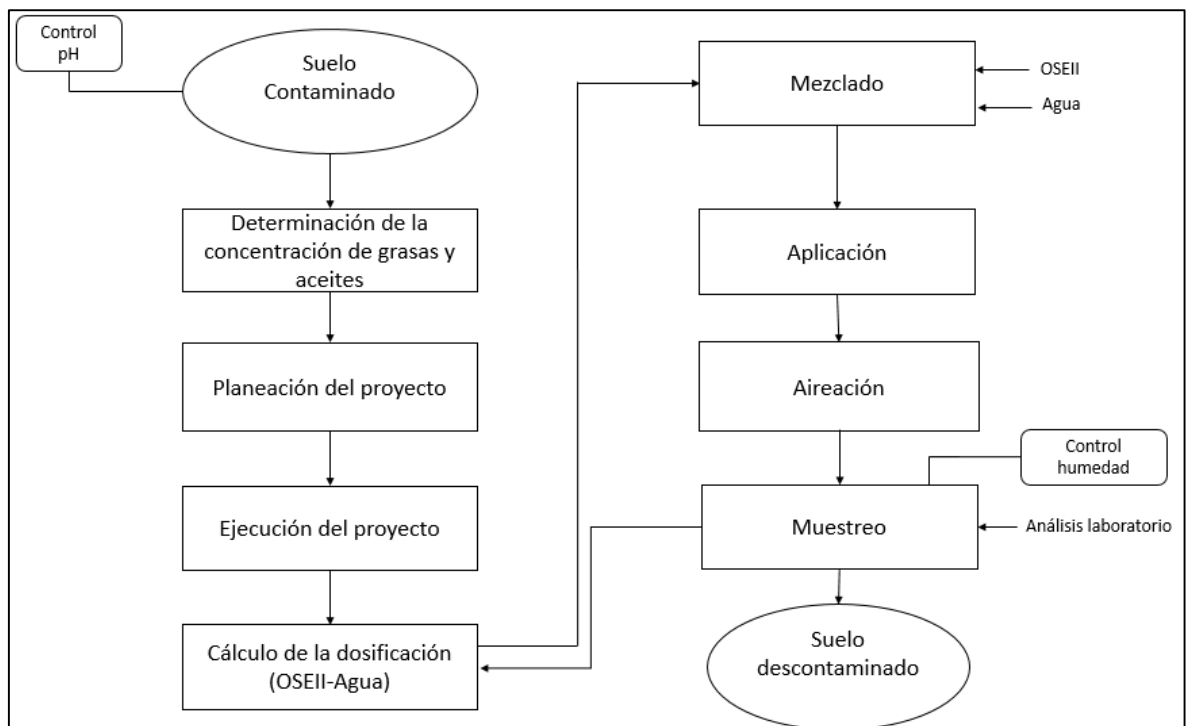
5.3 EQUIPOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Para escalar el proceso de biorremediación implementando la tecnología OSE II, se establece un volumen de 321 m³ de suelo contaminado con diésel tomando

como referencia una operación de EOM CONSULTING S.A.S y una concentración inicial de contaminante (grasas y aceites) del 26% (valor máximo que registran los análisis de laboratorio realizados en el desarrollado experimental).

A partir de la relación de dosificación propuesta (1 unidad volumétrica de OSE II por cada 85 unidades volumétricas de diésel), se realizan los respectivos cálculos para determinar la cantidad de agua y OSE II a aplicar y así dimensionar la capacidad requerida de los equipos, obteniéndose que, para tratar este volumen de suelo con esta concentración de contaminante se requieren 261 gal de OSE II y 13.050 galones de agua, para un total de 13.311 galones de mezcla OSE II-Agua. La figura 18. enseña el diagrama de proceso general para tratar el suelo, seguidamente, se detallan los equipos a utilizar para este caso.

Figura 18. Diagrama de proceso para la reducción de la concentración de grasas y aceites en el suelo



Fuente: Elaboración propia

Antes de entrar en detalle con la descripción de los equipos, debe mencionarse que la demanda de agua para el tratamiento (13050 gal), en este caso, es suministrada por carro tanques. Además, por experiencia de EOM CONSULTING S.A.S se recomienda que la totalidad de mezcla OSE II-Agua requerida no sea aplicada en una sola ocasión (tiempo 0) sino que su aplicación sea dividida en diferentes tiempos a lo largo del tratamiento. Con base a ello y a los días de operación estipulados anteriormente (32 días) a partir del análisis de regresión, se decide realizar 5 aplicaciones de mezcla OSE II-Agua iniciando desde el día 0 con un paso de 5 días, de este modo, se hacen aplicaciones en los días 0, 5, 10, 15 y

20. Teniendo en cuenta esto, en cada aplicación se deben mezclar 2610 gal de agua y 55 gal de OSE II (1 caneca) para un total de mezcla de 2665 gal. Asimismo, se plantea una toma de muestra de suelo cada 5 días para analizar y dar seguimiento del porcentaje de reducción de la concentración de grasas y aceites.

5.3.1 Fast Tank. El Fast Tank es un tanque plegable para almacenamiento de fluidos (agua potable, no potable e hidrocarburos) fabricado con lona poliéster de alta tenacidad y recubierto con películas de cloruro de polivinilo (PVC), totalmente impermeable y apto para trabajo pesado. Para cada aplicación, como se mencionó anteriormente, la cantidad de agua requerida es de 2610 gal (la cual es suministrada y depositada en el Fast Tank por un carro tanque de aproximadamente 2642 gal de capacidad); este Fast Tank durante la operación se utiliza para almacenar el agua, asimismo, en él se realiza la mezcla de OSE II-Agua, por lo que para determinar la capacidad total requerida debe incluirse el volumen de OSE II (55 gal). De este modo, la capacidad apropiada del Fast Tank es de 3000 gal, este se describe en el cuadro 18.

Cuadro 18. Especificaciones técnicas Fast Tank TFT11000


Tanque plegable Fast Tank TFT11000		
	Capacidad	3.000 gal 11.300 L
	Altura	1,2 m
	Diámetro	3,4 m
	Peso aproximado	98 Kg
	Funda contenedora: 0,65 m X 0,55 m X 0,30 m	
	Estructuras: 2 paquetes C/U de; 1,5 m X 0,25 m X 0,25 m	

Fuente: Colman. Nit: 800.087.160-6. (29, Octubre, 2019). [Cotización: No. GCC 9239-2019].

5.3.2 Motobomba. La motobomba MBPMD20 se utiliza para transportar determinada cantidad de líquido sin necesidad de mucha presión de una zona a otra. Dentro de la operación, esta cumple dos funciones: como primera función opcional, está el suministro de los 55 galones OSE II desde la caneca en la que está almacenado al Fast Tank. Luego, teniendo OSE II (55 gal) y agua en el Fast Tank (2.610 gal), la segunda función de la motobomba es mediante una configuración de circuito cerrado homogeneizar la mezcla en el tanque; el equipo adecuado para este caso se enseña en el Cuadro 19.

5.3.3 Bomba fumigadora de aspersión. Una vez terminado el proceso de homogeneización de OSE II-Agua en el Fast Tank mediante la motobomba, la aspersión de la mezcla al suelo se hace utilizando una fumigadora estacionaria diésel, teniendo en cuenta la presión y caudal con el que es capaz de entregar el fluido; a continuación se describe este equipo (cuadro 20).

Cuadro 19. Especificaciones técnicas motobomba MBPMD20

Motobomba caudal diésel 600l/min 4Hp		
	Diámetro entrada	2 in
	Tipo de combustible	Diésel
	Modelo	MBPMD20
	Capacidad	2,5 litros combustible
	Alto	55 cm
	Material	Aluminio
	Profundidad de succión	5 m.c.a
	Diámetro salida	2 in
	Ancho	43 cm
	Caudal máximo	600 L/min
	Altura máxima	26 m.c.a
	Potencia en HP	4 HP
	Caudal de salida	600 L/min
	Diámetro en pulgadas	2 in

Fuente: Ferretería LN y CIA SAS. Nit: 830.060.901-9. (26, octubre, 2019). [Cotización: No. LN-1-23-0015].

Cuadro 20. Especificaciones técnicas fumigadora estacionaria diésel 437-178F

Fumigadora estacionaria diésel 437-178F		
	Número de pistones	3
	Diámetro pistón	30 mm
	Caudal	30-40 L/min
	Presión	300-640 psi
	Velocidad	300-800 rpm
	Manguera fumigación	100 m
	Lanza/Pistola	Lanza
	Cap. Tanque Aceite	1,1 L
	Cap. Tanque combustible	0,3 gal
		3,5 L
	0,92 gal	

Fuente: Ferretería LN y CIA SAS. Nit: 830.060.901-9. (26, octubre, 2019). [Cotización: No. LN-1-23-0015].

5.3.4 Excavadora. Como se mencionó, hay diferentes opciones para realizar el proceso de aireación o volteo del suelo durante los días de tratamiento. En este caso, se plantea llevarlo a cabo mediante una excavadora, para ello, se tiene en cuenta el volumen total de suelo contaminado (321 m³) y la capacidad del cucharón de la excavadora, para que así en las 8 horas de volteo diario se logre airear todo el suelo. La excavadora 320 es adecuada para aplicaciones de servicio mediano a pesado, se presentan a continuación sus especificaciones técnicas (Cuadro 21).


Cuadro 21. Especificaciones técnicas Excavadora 320

Excavadora 320		
	Potencia del motor	157 HP
	RPM del motor (operación)	1.650 rpm
	RPM del motor (desplazamiento)	1.800 rpm
	Potencia bruta	118 HP
	Brazo	Alcance de 2.9 m
	Cucharón	1,19 m ³
	Alcance máximo en el nivel del suelo	32,3 ft
	Profundidad máxima de excavación vertical	17 ft
	Fuerza de excavación del cucharón	33.811 lbf
	Fuerza de excavación del brazo	23.212 ft
	Capacidad del tanque de combustible	87 gal
	Modelo del motor	C7.1ACERT CAT

Fuente: EQUIPOS Y CONSTRUCCIONES ARABA SAS. Nit: 900.979.719-3. (23, julio, 2019). [Cotización: No. C-19-7-02].

5.3.5 pHmetro. Para controlar el pH del suelo, se plantea hacer un análisis antes de la primera aplicación (día 0) y cada 5 días durante los restantes de tratamiento (día 5, 10, 15, 20 y 25). En el Cuadro 22 se describe un pHmetro digital el cual se puede utilizar para medir el pH de lodos o medios viscosos; si el suelo no presenta apariencia viscosa o no se encuentra como lodo, es importante humedecer la muestra de suelo hasta obtener la apariencia adecuada, y así realizar la respectiva medición con el equipo.

Cuadro 22. Especificaciones técnicas medidor de pH digital PCE-PH 26F

Medidor de pH digital PCE-PH 26F		
	Rango de medición pH	[-1, 15]
	Precisión pH	± 0.01
	Resolución pH	0.01
	Puntos de calibración pH	1, 2 o 3
	Rango de temperatura (°C)	[0,0-60]
	Resolución de temperatura (°C)	0.1
	Precisión temperatura (°C)	± 1
	Puntos de calibración temperatura	1
	Alimentación: 2 x Pilas de 1,5 V, tipo AAA	
	Dimensiones : 185 x 40 mm	
Peso: 100 g		
Pantalla LCD		
Electrodo pH intercambiable		
Con tapa protectora		

Fuente: HX HIGIELECTRONIX. Nit: 900.255.743-3. (25, octubre, 2019). [Cotización: No. COT 48754].

6. ANÁLISIS FINANCIERO

El presente capítulo tiene como objeto realizar un análisis financiero en el que se comparan los costos operacionales (partiendo de un caso de estudio) de la metodología implementada por EOM CONSULTING S.A.S y las modificaciones propuestas con el desarrollo de la investigación, entre estas se encuentra la dosificación, control de humedad, y tiempo de ejecución del proyecto.

A través de esto, se busca evaluar el costo de biorremediación del suelo contaminado con diésel por metro cúbico para así determinar la viabilidad de las propuestas planteadas.

En la tabla 25, se detallan las condiciones iniciales del caso de estudio a analizar.

Tabla 25. Información inicial del caso de estudio

Volumen total	321 m ³
Porcentaje de contaminación grasas y aceites	26%
Contaminante	Diésel B10

Fuente: Elaboración propia

Por último se realiza el cálculo de dos indicadores financieros (VPN y TIR) para evaluar la viabilidad del proyecto.

6.1 COSTOS OPERACIONALES

A continuación se detallan los costos relacionados con la ejecución del proyecto de estudio, mencionando así los costos de los equipos a utilizar en el proceso, los salarios de los empleados contratados, costo de la tecnología OSE II y los consumibles del proyecto.

6.1.1 Equipos y Maquinaria. Posteriormente se especifican los costos de los equipos que se van a utilizar durante la operación, realizando la clasificación de estos de acuerdo a la función que tienen en el proceso.

- **De contención:** El costo del Fast Tank con capacidad de 3000 gal corresponde al valor de alquiler propuesto por la empresa EOM CONSULTING S.A.S, ya que esta cuenta con el tanque.
- **De bombeo:** Los costos de la bomba fumigadora de aspersión y la motobomba, también son suministrados por la empresa, ya que hace parte de su inventario y son utilizadas en el proyecto con un costo de alquiler en el desarrollo de la operación.
- **Movimiento de tierra:** El costo de la excavadora está dado por un valor de alquiler y este servicio es subcontratado; y el kit de herramienta menor tiene un costo propuesto por EOM CONSULTING S.A.S.

- **De análisis:** Los equipos como el pHmetro y la balanza de humedad, tienen un costo de alquiler en la operación, y estos valores se determinan por el costo diario durante un año del equipo.

En la siguiente tabla, se presentan los costos de alquiler de los equipos mencionados.

Tabla 26. Costos de alquiler de los equipos y maquinaria de la operación

Equipo o Maquina	Cantidad	Costo Alquiler* / día
Fast Tank (3,000 gal)	1	50.000
Bomba Fumigadora de aspersión	1	95.310
Motobomba	1	90.000
Excavadora	1	720.000**
Kit de herramienta menor	1	28.593
pHmetro	1	3.900
Balanza de humedad	1	39.200

Fuente: EOM CONSULTING S.A.S y propia

(*) COP

(**) Este valor incluye operario y combustible de la máquina

6.1.2 Personal. Para el proceso de biorremediación del caso de estudio planteado se requieren dos operarios, encargados de la aplicación de la tecnología, supervisión de los equipos y actividades derivadas del proceso; y un ingeniero a cargo de la dirección del proyecto. El costo de mano de obra de cada empleado se detalla en la tabla 27, en la que se tiene en cuenta el salario junto con sus prestaciones sociales (Subsidio de transporte, Salud – 8.50% , Pensión – 12%, ARL Nivel V – 6.96%, Parafiscales – 9%, Prima – 8.33%, Cesantías – 8.33%, Intereses sobre cesantías – 12%, Vacaciones – 4.17%, Dotación – 5%)⁸¹.

Dentro de estos costos también se contemplan aquellos relacionados con los elementos de protección personal, entregados a los operarios del proyecto; por esta razón el valor de la dotación en estos empleados no se contempla, ya que los elementos son suministrados en el desarrollo de la prueba.

Tabla 27. Cálculo de costos de mano de obra por mes

Costo	Operario*	Ingeniero*
Salario	\$1.500.000	\$2.500.000
Auxilio de Transporte	\$97.032	\$0
Salud	\$127.500	\$212.500
Pensión	\$180.000	\$300.000

⁸¹ KONTAMAS. ¿Cuánto cuesta un empleado en el 2019?. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-25. Disponible en: <https://kontamas.com/cuanto-cuesta-un-empleado-en-el-2019/>

Tabla 27. (Continuación)

Costo	Operario*	Ingeniero*
ARL	\$104.400	\$174.000
Parafiscales	\$135.000	\$225.000
Prima	\$124.950	\$208.250
Cesantías	\$124.950	\$208.250
Intereses sobre las cesantías	\$180.000	\$300.000
Vacaciones	\$62.000	\$104.250
Dotación	\$0	\$125.000
TOTAL	\$2.636.382	\$4.357.250

Fuente: Elaboración propia

(*) COP

A continuación, en la tabla 28 se describen los elementos a utilizar durante la operación.

Tabla 28. Costos de elementos de protección personal

Elementos	Unidad de medida	Cantidad	Valor*
Guantes de nitrilo	PAR	1	5.825
Guantes de vaqueta	PAR	1	9.000
Overoles	UNIDAD	1	53.797
Casco de seguridad	UNIDAD	1	21.074
Botas de seguridad con puntera	PAR	1	47.655
Gafas de seguridad	UNIDAD	1	6.354
Monjas - Gorro tipo soldador	UNIDAD	1	12.708
Protector auditivo de inserción	UNIDAD	1	2.965
Tapabocas desechables	UNIDAD	1	847
TOTAL			160.225

Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

(*) COP

6.1.3 Consumibles. En el cuadro 23, se presentan los costos del combustible para la operación de las máquinas y equipos, la tecnología OSE II, el suministro de agua para el tratamiento, al igual que los costos de los laboratorios para el respectivo monitoreo de la zona en tratamiento.

Cuadro 23. Costos de materiales consumibles en una operación de biorremediación de grasas y aceites

Ítem	Unidad de medida	Cantidad	Valor*
Combustible Diésel para operación de equipos	GALONES	1	9.500
Tecnología OSE II	GALONES	1	436.364
Suministro de agua (Tanque 3,000 galones)	VIAJE	1	120.000
Análisis físico de laboratorio **	UNIDAD	1	146.300
Análisis de seguimiento de Grasas y Aceites	UNIDAD	1	77.000

Fuente: EOM CONSULTING S.A.S y propia

(*) COP

(**) Análisis físico incluye: Textura, densidad real, densidad aparente y porosidad.

6.2 COMPARATIVO DE COSTOS

Para realizar el costo de la operación tratada como lo establece EOM CONSULTING S.A.S y con las propuestas y modificaciones planteadas en el desarrollo del proyecto, se tienen en cuenta los costos mencionados en el ítem 6.1 (Costos operacionales).

6.2.1 Costos EOM CONSULTING S.A.S. En la figura 19, se contemplan los costos propuestos por la empresa para el tratamiento planteado, con un tiempo de operación de 21 días.

Como se observa en la figura 19, tratar los 321 m³ contaminados con diésel B10 tiene un costo de \$195.410.463 pesos colombianos.

Figura 19. Costos propuestos por EOM CONSULTING S.A.S.

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD Y/O SERVICIOS	VR. UNITARIO	SUB TOTAL
REINTEGRO DE COSTOS Y GASTOS				
I) PERSONAL				7.201.902
PERSONAL SALARIOS				6.741.042
Ingeniero de proceso (Incluye prestación de servicios)	SERVICIOS	1	145.242	3.050.082
Auxiliares Operativos (Incluye prestación de servicios)	PERSONAL	2	87.880	3.690.960
ELEMENTOS PROTECCION PERSONAL -				460.860
Guantes de nitrilo	PAR	10	5.825	58.250
Guantes de vaqueta	PAR	8	9.000	72.000
Overoles	UNIDAD	2	53.797	107.594
Casco de seguridad	UNIDAD	2	21.074	42.148
Botas de seguridad con puntera	PAR	2	47.655	95.310
Gafas de seguridad	UNIDAD	2	6.354	12.708
Monjas - gorro tipo soldador	UNIDAD	2	12.708	25.416
Protector auditivo de Inserción	UNIDAD	4	2.965	11.860
Tapabocas desechables	UNIDAD	42	847	35.574
II) MATERIALES Y CONSUMIBLES				140.798.364
Combustible tipo Diesel para Operación diaria de Equipos	GALONES	6	9.500	57.000
Tecnología OSE II	GALONES	320	436.364	139.636.364
Suministro de Agua para tratamiento (3000 gal)	VIAJE	6	120.000	720.000
Análisis de Seguimiento Grasas y Aceites	UNIDAD	5	77.000	385.000
III) EQUIPOS				18.771.963
Fast tank de 3000 gls	DÍA	1	50.000	1.050.000
Kit Herramienta Menor (Zonas de trabajo 3)	DÍA	1	28.593	600.453
Servicio de Excavadora	DÍA	1	720.000	15.120.000
Bomba fumigadora de aspersión	DÍA	1	95.310	2.001.510
IV) VEHICULOS - MAQUINARIA				3.150.000
Camioneta 4X4	DÍA	1	150.000	3.150.000
PRESUPUESTO DETALLADO				169.922.229
ADMINISTRACION/IMPREVISTOS/UTILIDAD (15%)				25.488.334
PRESUPUESTO AIU INCLUIDO				195.410.563
TOTAL VALOR PRESUPUESTO.				195.410.563

Fuente: EOM CONSULTING S.A.S

6.2.2 Costos con modificaciones propuestas. Estos costos contemplan la nueva proporción de dosificación (1 unidad volumétrica de OSE II remedia 85 unidades volumétricas de diésel B10) obtenida en el análisis del experimento, al igual que se plantean los costos para 31 días de operación, y se propone el uso de la balanza para cálculo de la humedad del suelo y el pHmetro; también se tienen en cuenta costos entregados por la empresa al desarrollar una operación. Esto se puede apreciar en la figura 20.

Los costos con las modificaciones descritas, son de \$186.888.809 pesos colombianos, para remediar 321 m³ de suelos contaminado.

Figura 20. Costos de la operación con las modificaciones propuestas

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDAD Y/O SERVICIOS	VR. UNITARIO	SUB TOTAL
REINTEGRO DE COSTOS Y GASTOS				
I) PERSONAL				10.607.406
PERSONAL SALARIOS				9.951.062
Ingeniero de proceso (Incluye prestación de servicios)	SERVICIOS	1	145.242	4.502.502
Auxiliares Operativos (Incluye prestación de servicios)	PERSONAL	2	87.880	5.448.560
ELEMENTOS PROTECCION PERSONAL -				656.344
Guantes de nitrilo	PAR	16	5.825	93.200
Guantes de vaqueta	PAR	12	9.000	108.000
Overoles	UNIDAD	4	53.797	215.188
Casco de seguridad	UNIDAD	2	21.074	42.148
Botas de seguridad con puntera	PAR	2	47.655	95.310
Gafas de seguridad	UNIDAD	2	6.354	12.708
Monjas - gorro tipo soldador	UNIDAD	2	12.708	25.416
Protector auditivo de Inserción	UNIDAD	4	2.965	11.860
Tapabocas desechables	UNIDAD	62	847	52.514
II) MATERIALES Y CONSUMIBLES				115.417.509
Combustible tipo Diesel para Operación diaria de Equipos	GALONES	10	9.500	95.000
Tecnología OSE II	GALONES	261	436.364	113.890.909
Suministro de Agua para tratamiento (3000 gal)	VIAJE	5	120.000	600.000
Análisis parámetros físicos	UNIDAD	2	146.300	292.600
Análisis de Seguimiento Grasas y Aceites	UNIDAD	7	77.000	539.000
III) EQUIPOS				31.837.093
Motobomba	DÍA	1	90.000	2.790.000
Fast tank de 3000 gls	DÍA	1	50.000	1.550.000
Kit Herramienta Menor (Zonas de trabajo 3)	DÍA	1	28.593	886.383
Servicio de Excavadora	DÍA	1	720.000	22.320.000
Bomba fumigadora de aspersión	DÍA	1	95.310	2.954.610
pHmetro	DÍA	1	3.900	120.900
Balanza de humedad	DÍA	1	39.200	1.215.200
IV) VEHICULOS - MAQUINARIA				4.650.000
Camioneta 4X4	DÍA	1	150.000	4.650.000
PRESUPUESTO DETALLADO				162.512.008
ADMINISTRACION/IMPREVISTOS/UTILIDAD (15%)				24.376.801
PRESUPUESTO AIU INCLUIDO				186.888.809
TOTAL VALOR PRESUPUESTO.				186.888.809

Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Costo por metro cúbico. Con el fin de comparar los costos entre EOM CONSULTING S.A.S y las propuestas planteadas, se calcula el costo de biorremediación por metro cúbico, con la ecuación 14.

Ecuación 14. Costo de remediación por metro cúbico

$$\$/m^3 = \frac{\$Operación}{V_{tratamiento}}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde:

\$: costo (COP)

m³: metro cúbico

\$ Operación: costo de la operación (COP)

V Tratamiento: volumen total de tratamiento

De esta manera se obtiene los costos, tabulados en la tabla 29.

Tabla 29. Costos de remediación por metro cúbico

Nombre	Costo total de la operación	Volumen tratado (m ³)	\$ / m ³
EOM	\$195.410.463	321	608.800
Propuesta	\$186.888.809	321	582.300

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar el costo de remediación por metro cúbico con las propuestas planteadas, específicamente la dosificación para remediar suelo contaminado con diésel B10 es de \$582.282 (menor al costo de remediación por metro cúbico tratado por EOM CONSULTING S.A.S (\$608.756)). Por tanto, ya que se logra una reducción de costos con respecto a lo planteado por la empresa, la implementación de la propuesta presentada es económicamente viable.

6.3. INDICADORES ECONÓMICOS

“La evaluación financiera, define, desde el punto de vista de un inversionista, si los ingresos que recibe son superiores a los dineros que aporta. Se basa en las sumas de dinero que el inversionista recibe, entrega o deja de recibir y emplea precios del mercado o precios financieros para estimar las inversiones, los costos de operación y de financiación y los ingresos que genera el proyecto”⁸².

La evaluación financiera de este proyecto se desarrollará por medio del cálculo de dos indicadores financieros, estos son: el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR).

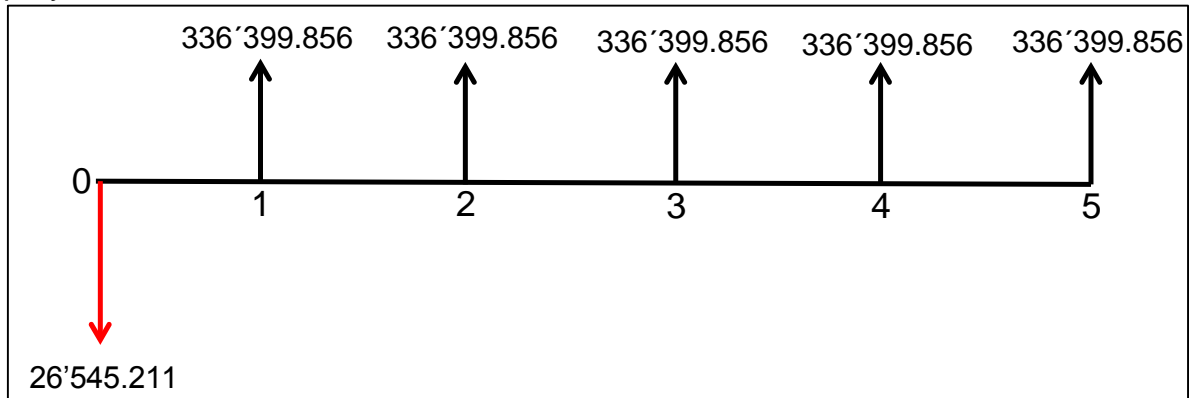
Para esto, se tiene en cuenta que el proyecto con las modificaciones propuestas se puede realizar hasta 6 veces al año, ya que el tiempo de desarrollo de cada proyecto es de aproximadamente 60 días, en el que se tiene en cuenta la ejecución de la prueba, presentación de informes y verificación de datos.

A continuación, en la imagen 6, se presenta el diagrama de flujo del proyecto, evaluado a cinco años, donde las flechas hacia abajo representan el flujo de efectivo neto negativo y las flechas hacia arriba, representan todo flujo de efectivo neto positivo⁸³.

⁸² ARBOLEDA VÉLEZ, Germán. Evaluación de proyectos. En: Proyectos: Formulación, evaluación y control. [Físico]. 5ta edición. Cali, Colombia: Cargraphics, 2003. p. 339. ISBN: 958-96485-0-9.

⁸³ Ibid., p. 341.

Imagen 6. Diagrama de flujo del proyecto con las modificaciones propuestas proyectado a 5 años.



Fuente: Elaboración propia

6.3.1 Valor Presente Neto (VPN). El indicador financiero Valor Presente Neto (VPN) indica la ganancia y viabilidad de una inversión o proyecto, medida en unidades monetarias actuales. Este indicador matemáticamente es igual a la sumatoria del valor presente de los ingresos netos a una tasas de interés (i), menos la sumatoria del valor presente de los egresos netos a una tasas de interés (i). En la siguiente ecuación, se presenta lo anteriormente descrito.

Ecuación 15. Valor presente neto

$$VPN_{(i)} = \sum_{j=0}^n VPI_j(i) - \sum_{j=0}^n VPE_j(i)$$

Fuente: ARBOLEDA VÉLEZ, Germán. Evaluación de proyectos. En: Proyectos: Formulación, evaluación y control. [Físico]. 5ta edición. Cali, Colombia: Cargraphics, 2003. p. 346. ISBN: 958-96485-0-9.

Donde:

$VPI_j(i)$: valor presente del ingreso neto del periodo j , a una tasa de interés i .

$VPE_j(i)$: valor presente del egreso neto del periodo j , a ua tasa de interés i .

N : número de periodos.

Tomando i como la tasa de interés de oportunidad ($TIO = 30\%$) de EOM CONSULTING S.A.S, se obtiene un VPN de \$792'780.103 COP, el cual indica que el proyecto se justifica desde el punto de vista financiero (los dineros invertidos en el proyecto rinden más que i), ya que $VPN > 0$.

6.3.2 Tasa interna de Retorno (TIR). El indicador financiero TIR de un proyecto es la tasa de interés que devengan los dineros que permanecen invertido en el proyecto⁸⁴. Matemáticamente se puede definir como la tasa de interés necesaria

⁸⁴ Ibid., p. 350.

para que el valor presente neto (VPN) sea igual a cero, es decir, si $VPN(i) = 0$, entonces $TIR = i$.⁸⁵

Con ayuda de una hoja de cálculo del programa Excel, el cual utiliza una metodología de convergencia matemática se determinó esta, obteniendo un valor de 1267,2%.

El criterio de selección sugiere que si la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de interés de oportunidad ($TIR > TIO$) el proyecto resulta viable, ya que la rentabilidad específica del proyecto supera las expectativas del inversionista comparado con su tasas de rentabilidad esperada. Por lo tanto, se confirma que las propuestas planteadas obtenidas en el desarrollo experimental sobre la efectividad de la tecnología OSE II resultan ser factibles financieramente, ya que se cumple el criterio de selección ($1267,2\% > 30\%$).

⁸⁵ Ibid., p. 349.

7. CONCLUSIONES

A partir de la evaluación de la remoción de grasas y aceites de suelo contaminado con diésel B10 y biodiésel aplicando la tecnología OSE II implementada por EOM CONSULTING S.A.S, se puede concluir que:

- Se especificó el tipo de suelo a utilizar en la evaluación mediante la selección de la clase textural limosa, la cual presenta una permeabilidad moderada, es decir que permite que el contaminante se infiltre en su estructura.
- La tecnología OSE II es efectiva ya que con las tres dosificaciones planteadas (1:25, 1:37.5 y 1:50) se observó un comportamiento descendente de la concentración de grasas y aceites en los suelos contaminados con diésel B10 y biodiésel.
- En las muestras contaminadas con diésel B10 se observa una mayor reducción de grasas y aceites comparado con aquellos contaminados con biodiésel en los 28 días de tratamiento, esto debido a la complejidad de las moléculas que lo conforman.
- Se identifica la relación de dosificación con mayor porcentaje de reducción de grasas y aceites para los dos escenarios desarrollados: 1:50 para el suelo contaminado con diésel B10 (obteniendo un porcentaje de reducción del 83%) y 1:25 para suelos contaminados con biodiésel (con un porcentaje de reducción del 47%).
- Los requerimientos técnicos necesarios para la ejecución del proyecto se especifican con el dimensionamiento de los realizado a nivel laboratorio, contando así con equipos y máquinas que permitan la contención del agua para el posterior tratamiento (fast tank), la mezcla de la tecnología OSE II con el agua (motobomba), la aplicación de esta en el suelo contaminado (bomba fumigadora estacionaria) y la aireación del suelo (retroexcavadora).
- Se realiza un comparativo del costo de remediación por metro cúbico realizado por EOM CONSULTING S.A.S dando como resultado \$608.800, y, para las modificaciones propuestas el costo es de \$582.300, logrando así un ahorro del 4.35%.
- Mediante los indicadores financieros VPN y TIR se puede evidenciar que el proyecto es financieramente viable, obteniéndose como resultados \$792'780.103 COP y 1267,2%, respectivamente.

8. RECOMENDACIONES

- Evaluar la efectividad de la tecnología OSE II para tratar suelos con clases texturales diferentes a la presentada en esta investigación (limosa), asimismo, determinar si la relación de dosificación depende del tipo de suelo.
- Como se expuso en el documento, se recomienda a EOM CONSULTING S.A.S llevar un control apropiado del contenido de humedad del suelo durante la operación con ayuda de una balanza analizadora de humedad, la cual permite de manera rápida obtener datos acertados y confiables, ya que este es un parámetro de gran influencia en el proceso de biorremediación.
- Ya que la tecnología OSE II es un multienzimático que acelera la degradación de sustancias orgánicas, se recomienda realizar un análisis detallado y microscópico para conocer el accionamiento del producto; ya que en el desarrollo de la investigación se pudo observar que, la aceleración de la degradación del contaminante no depende de una dosificación más concentrada de producto.
- Con la caracterización de los parámetros mencionados en la norma Louisiana 29B, específicamente lo metales pesados, se evidencia que existe una reducción en estos valores; por tanto se recomienda evaluar la eficiencia de la tecnología al encontrar concentraciones de metales más altas en recursos naturales (agua y/o suelo), para descontaminar los mismos; de esta manera la empresa EOM CONSULTING S.A.S puede incursionar en nuevos mercados.
- En el análisis de la investigación, se pudo determinar que para suelos contaminados con diésel B10 (combustible de mayor consumo en el país) hay una efectividad del producto para remediar la contaminación, encontrando la proporción de dosificación, 1 unidad volumétrica de OSEII remedia 85 unidades volumétricas de diésel; por esto se recomienda realizar análisis experimentales con esta proporción, para comprobar la hipótesis que se basa en un mayor rendimiento de la tecnología (con respecto a la estándar – 1:50) para la descontaminación de suelos con diésel.
- De igual manera, se recomienda analizar la proporción de dosificación obtenida en el experimento (1:39) en el escenario de suelos contaminados con biodiésel, y sobre esta realizar ajustes o modificar condiciones, ya que en el desarrollo experimental, se pudo evidenciar que solo hay un 50% de reducción de contaminante en 28 días.

- Evaluar la efectividad de la tecnología en la remoción de grasas y aceites en cuerpos de agua, ya que hay derrames que contaminan el recurso hídrico y es necesario el tratamiento de este.
- Ya que con el desarrollo del experimento se evidencia que los suelos no cumplen con la norma Louisiana 29B en 28 días de tratamiento, se recomienda llevar este a 31 y 58 días como se especifica en la sección de análisis de resultados, para así validar que de esta manera se dará cumplimiento a la norma.
- Con el fin de garantizar que los suelos se encuentren totalmente remediados, se sugiere realizar un análisis de la concentración de grasas y aceites después de haber finalizado el tratamiento, ya que en algunos casos y debido a los procesos biológicos de remediación puede llegar a presentar un aumento.

BIBLIOGRAFÍA

ARBOLEDA VÉLEZ, Germán. Evaluación de proyectos. En: Proyectos: Formulación, evaluación y control. [Físico]. 5ta edición. Cali, Colombia: Cargraphics, 2003. p. 339-350. ISBN: 958-96485-0-9.

BAUTISTA, María y OLIVER, Joana. Determinación de la textura al tacto. [Video]. 2017. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/84041> el 25 de mayo de 2019.

BERMÚDEZ, Mauricio. Contaminación y Turismo Sostenible. Clasificación de los contaminantes. 01 de enero 2010. Pág. 6.

CARDEÑO, F y GALLEGO, L. Refinación de la fase glicerina del biodiésel de aceite de palma empleando ácidos minerales. Grupo procesos fisicoquímicos aplicados. *Información Tecnológica*. 22 de marzo de 2011, vol. 22, nro. 6, pp. 15-24. ISSN 0718-0764.

CHRISTMAN, Keith. Cloro. [En Línea]. Recuperado en 2019-08-17. Disponible en: <https://www.eird.org/estrategias/pdf/spa/doc14585/doc1485.pdf>

CARROW, Robert & DUNCAN, Ronny. Best management practices for saline and sodic turfgrass sites. New York: CRC Press Taylor and Francis Group. 2012. 87 p. ISBN: 978-1-4398-1475-8 (eBook - PDF).

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 1001. (25, mayo, 2010). Por la cual se otorga una licencia ambiental y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 2911 (18 de diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C: El Ministerio.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 321 (17 de febrero, 1999). Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas. Bogotá: El Ministerio.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 4741 (30 de diciembre, 2005). Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá: El Ministerio.

COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 40174 de 2019. (24, febrero, 2019). Por la cual se establece de forma temporal el porcentaje de mezcla de biocombustible para uso en motores diésel en algunos departamentos del país. Bogotá: El Ministerio.

-----. Resolución 40184 de 2018. (28, febrero, 2018). Por la cual se modifica la Resolución 182142 de 2007, en relación con el porcentaje de mezcla de biocombustible para uso en motores diésel, en Bogotá, D.C., centro del país y llanos orientales. Bogotá: El Ministerio.

CONTRERAS, Ramón. ¿Qué es y por qué es importante el ciclo de Krebs?. 2014. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-20. Disponible en: <https://biologia.laguia2000.com/bioquimica/que-es-y-por-que-es-importante-el-ciclo-de-krebs>

ECOPETROL. Reporte integrado de Gestión sostenible 2018. En: Comercial y Mercadeo. [en Línea]. p. 12-159. Recuperado en 2019-07-21. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/Asamblea2019/reportes-integrados-gestion-sostenible-2018.pdf>

ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROPECUARIA CERRO AZUL. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos. En: Tipo y cantidad de muestra a tomar. 2012. [En línea]. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-tnicas_de_toma_y_remisin_de_muestras_de_suelos.pdf

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. [sitio web]. Plantas productoras de biodiesel en funcionamiento. [Consulta: 17 agosto 2019]. Disponible: www.fedebiocombustibles.com

FERNÁNDEZ, Jorge. Cátedra Máquinas térmicas. [En Línea]. Recuperado en 2019-07-25. Disponible en: http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf

GAS Y ENERGÍA. [Sitio Web]. Valle del Cauca: Canasta Energética. [Consulta: 10 Agosto 2019]. Disponible en: <http://www.gasyenergia.com/datos-tecnico>

GÓMEZ ROMERO, Sara, *et al.* Factores bióticos y abióticos que condicionan la biorremediación por *Pseudomonas* en suelos contaminados por hidrocarburos. 9 de enero-junio de 2008. vol. 6, nro. 9, pp. 76-84. ISSN 1794-2470.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. Introducción al análisis de experimentos. 2 ed. McGraw Hill, 2008. p. 6-128. ISBN-10: 970-10-6526-3.

HERNEY, Geovanny. Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar bajo la aplicación de biosólidos. Trabajo de grado ingeniero agrícola. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola, 2012. p. 16-22.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El Instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Hidrocarburos (HC) en aguas por extracción Soxhlet líquido-líquido y gravimetría. Subdirección de Hidrología – Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. 2017. Cód: TP0155.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Cesar Escala 1 : 100.000. En: *Descripción de los suelos de las unidades cartográficas de suelos*. Bogotá: IGAC, 2016. p. 259-262.

------. Instructivo Determinación de la textura del suelo – Hidrómetro de Bauyoucos – Densimétrico – Método IGAC – Adaptado a los suelos colombianos. Grupo interno de trabajo laboratorio nacional de suelos. 2018. Cód: I40600-25/18.V8.

------. Suelos y tierras de Colombia. En: *Propiedades físicas fundamentales*. Tomo II. Bogotá: IGAC, 2016. p. 31. ISBN: 978-9588323-85-5.

KONTAMAS. ¿Cuánto cuesta un empleado en el 2019?. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-25. Disponible en: <https://kontamas.com/cuanto-cuesta-un-empleado-en-el-2019/>

JASCHEK, Jimena. Medidas de sodicidad: RAS y PSI. 2016. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-25. Disponible en: <https://www.tiloom.com/medidas-de-sodicidad-ras-y-psi/>

JORDÁN LÓPEZ, Antonio. Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla, 2006. [en línea]. Disponible en: <http://files.infoagroconstanza.webnode.es/200000017c2dccc3d62/edafologia%20del%20suelo.pdf> p. 15-66.

LONDOÑO, Luis & LONDOÑO, Paula & MUÑOZ, Fabián. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. En: *Biotecnología en el sector agropecuario e industrial*. [En Línea]. Universidad de Cauca: Julio – Diciembre,

2016, vol. (14), No. (2), p. 145-153. [Consultado de: 20 de septiembre de 2019]. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
LOZANO, Nelly. Biorremediación de ambientes contaminados con petróleo. En: *Tecnogestión Una mirada al ambiente*. Pontificia Universidad Javeriana.: Septiembre, 2005, vol. (2), No. (1), p. 51-55. [Consultado el día 26 de septiembre de 2019]. Disponible en: [file:///Users/admin/Downloads/4326-Texto%20del%20art%C3%ADculo-18518-1-10-20130823%20\(1\).pdf](file:///Users/admin/Downloads/4326-Texto%20del%20art%C3%ADculo-18518-1-10-20130823%20(1).pdf)

MARCHÁN, Joaquín. Cadena respiratoria y fosforilación oxidativa. 2019. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-21. Disponible en: <https://www.studocu.com/en/document/universidad-nacional-del-sur/quimica-biologica/lecture-notes/7-cadena-respiratoria-y-fosforilacion-oxidativa/2813565/view>

MENDOZA, Reynaldo. & ESPINOZA, Ariel. Guía técnica para muestreo de suelos. En: Planificación para el muestreo de suelos. 2017. [En línea]. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: <http://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>

MINISTERIO DEL AMBIENTE DE PERÚ. Guía para el muestreo de suelos. En: Plan de muestreo. 2014. [En línea]. Recuperado en 2019-10-27. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>

MUSKUS, Angélica y QUINTERO, Claudia. Manual de Laboratorio Caracterización de Suelos. Universidad Nacional de Colombia, 2016. p. 22-29.

OBLASSER, A, et al. Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados [en línea]. [Consultado el 22/08/2019]. Disponible en : https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/06/Manual-de-Tecnolog%C3%ADas-de-Remediaci%C3%B3n-de-Sitios-Contaminados_baja.pdf

OIL SPILL EATER INTERNATIONAL, CORP. OIL SPILL EATER II Technical Information. Natural Biologic Enzyme. Dallas, Texas, 2010. 233 p. [en línea]. Disponible en: http://www.osei.us/wp-content/uploads/OSEI-Manual_FINAL-2016-1.pdf

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. El manejo de suelos afectados por salinidad. (s.f.). [en Línea]. Recuperado en 2019-09-20. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-afectados-por-salinidad/es/>

------. Propiedades físicas del suelo. Estructura. [sitio web]. FAO. [Consulta: 15 agosto 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/home/es/>

----- [Sitio web]. FAO, Textura del suelo. [Consulta: 8 mayo 2019]. Disponible en:

http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

ORTIZ BERNAD, Irene, *et al.* Informe de Vigilancia Tecnológica. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Elecé Industria Gráfica, 2007. M-5.839-2007. p. 21-52.

POLO, Alfredo; HERNÁNDEZ, Diana y FRITIS, Héctor. Contaminación y restauración de suelos. *Ciencia y Medio Ambiente*, 2002. pp.105-114.

PONCE CONTRERAS, Daniela. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. [En línea]. Trabajo de grado. Universidad del Bio-Bio, 2014. [Consultado el 25/08/2019]. Disponible en: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/135/3/Ponce%20Contreras%2C%20Daniela.pdf>

RAMIREZ, Roberto. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. 1 ed. Produmedios, calidad editorial y audiovisual agropecuaria. Santafé de Bogotá, D.C., septiembre de 1997. pp. 12-13.

REYES, G. (27 de mayo de 2019). Aumento del PIB no se traduce en oportunidades para la población. *Portafolio*. Recuperado de: <https://www.portafolio.co/economia/de-colombia-en-2019-sectores-y-factores-en-el-crecimiento-de-la-produccion-529986>

RINCÓN, Sandra & MARTÍNEZ, Daniel. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. En: *Revista Palmas*. [En línea]. Bogotá: enero, 2009, vol. (30), No. (2), p. 11-24. [Consultado: 25 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1432>

SHELL. Ficha de datos de seguridad. Diésel industrial (destilado). [en línea]. 1 ed. p.1. Disponible en: <http://www.ecosmep.com/cabecera/upload/fichas/4906.pdf>

SOFTWARE. (25 de octubre de 2019). Minitab. *Descripción del producto*. Recuperado de: <https://software.com.co/p/minitab>

STANDARD METHODS. Standard methods for the examination of water and wastewater. 5520 OIL AND GREASE (2017). 2018. Disponible en: <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.107>

SUAREZ BELTRAN, Roland. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.[En línea]. Universidad libre, Instituto de Posgrados Ingeniería, Bogotá D.C, 2013. [Consultado el 27/10/19]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FIN%20AL%20cd.pdf?sequence=1>

TORRES DELGADO, Katherine y ZULUAGA, Tatiana. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos.[En línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009. p. 41 [Consultado el 25/08/2019]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/815/1/32242005_2009.pdf

UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO. Bioquímica. En: *Catabolismo de los ácidos grasos*. 2016. [En Línea]. Recuperado en 2019-09-20. Disponible en: <https://www.studocu.com/es/document/universidad-alfonso-x-el-sabio/bioquimica/apuntes/tema-7-catabolismo-de-los-acidos-grasos/1433803/view>

UNIVERSIDAD DE MARYLAND, COLLEGE PARK. Aceites y Grasas: Funciones y propiedades de las grasas y los aceites hidrogenados y su relación con los no hidrogenados. En: *Revista Palmas*. [En línea]. Washington: 1991, vol. (12), No. (4), p. 61-67. [Consultado: 25 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/300/300>

UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE. Determinación del contenido graso de leche en polvo: Extracción Soxhlet. Técnicas avanzadas en Química Práctica 5. 2005. Ciencias Ambientales. Disponible en: https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP5_0405.pdf

VALORA ANALITIK. (21 de marzo de 2019). Tres compañías tienen más del 75% de mercado de distribución de combustibles. *Valora Analitik*. Recuperado de: <https://www.valoraanalitik.com/2019/03/21/tres-companias-tienen-mas-del-75-de-mercado-de-distribucion-de-combustibles/>

VELÁSQUEZ, Johana. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 01 de junio de 2017. vol. 8. p. 151-167. ISSN 2145-6097.

ANEXOS