



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Comparación del efecto de dos métodos de
biorremediación en las propiedades geotécnicas de un
suelo fino contaminado con diésel**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

Presenta:

Ing. Pamela García Ramírez

Dirigido por:

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza

Querétaro, Qro. a 17 de Octubre, 2019



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

Comparación del efecto de dos métodos de biorremediación en las propiedades geotécnicas de un suelo fino contaminado con diésel

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

Presenta:

Ing. Pamela García Ramírez

Dirigido por:

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza

Presidente

Dr. Víctor Pérez Moreno

Secretario

Dr. Eduardo Rojas González

Vocal

Dr. Omar Chávez Alegría

Suplente

Dra. Arely Iraís Cárdenas Robles

Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
17 Octubre, 2019

**Esta investigación se desarrolló en el
Laboratorio de Geotecnia Ambiental**

*“Cuando realmente quieres una cosa, todo el universo
conspira para ayudarte a conseguirla”.*

Paulo Coelho

“No basta tener buen ingenio; lo principal es aplicarlo bien”

René Descartes

Dirección General de Bibliotecas UAQ

DEDICATORIA

Con mucho amor:

A mi padre, Betitito, banco de sabiduría y mi mayor ejemplo de paciencia, a mi madre, Marichuy, mujer de perseverancia y carácter; quienes me ha enseñado que todo lo puedo, consejeros y mi apoyo en cada paso. Me han dado la confianza de abrir mis alas y diseñar mi camino desde siempre.

A mis mejores amigas y hermanas, Mache y Jani, mis aliadas y confidentes. Quienes me prestaron un hombro para hablar todas las noches fuera de casa, y me llenaron de aliento para no desistir.

A la memoria de mi ángel eterno, Arly, el ser más dulce del universo, siempre cuidándome (2002-2014).

A la memoria de mi primer sobrino, Noel, quien inundó mi alma de alegría desde el momento que supe que llegaría a nuestras vidas (2018).

A mi abuelita Bella, quien me ha enseñado a siempre confiar en Dios, y quien me recuerda cuanto me extraña a cada oportunidad.

Hemos estado separados mucho tiempo, pero siempre hemos permanecido unidos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza, la sabiduría y el coraje para lograr las cosas. Por permitirme soñar en grande y desear tanto las cosas hasta obtenerlas.

A mis padres, por ser mi cimiento y pilar más grande en la vida. Por su tiempo, su paciencia, su amor y su enorme sabiduría.

A mis hermanas, Mache, Jani, y Arly (mi bello ángel), por creer siempre en mí, por hacerme fuerte y grande, por llorar conmigo, pero también reír. Les agradezco infinitamente estar siempre ahí, siempre unidas.

A mi abuelita Bella, y mi familia, por creer en mí, por alentarme a no desistir y apoyarme en cada paso.

A Erick, especialmente, por su apoyo profesional y anímico, su amistad, su cariño incondicional y su paciencia.

A mis compañeros de maestría, Nayeli, Javier y Juan Pablo por el apoyo y las vivencias compartidas. En especial a Ángel, Ricardo, Ileri y Fer, por ser mi pequeña familia en este largo recorrido.

A mi asesor de Tesis, Dr. Christian Hernández, por su apoyo económico, por ser mi guía en el proyecto y mi amigo durante este tiempo.

Al Dr. Omar Chávez por las enseñanzas y las oportunidades para seguir creciendo. Por su apoyo y aprecio.

A la Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea por su tiempo, su apoyo y el espacio para seguir creciendo. Por su confianza y aprecio.

A mis catedráticos, por todas sus enseñanzas y consejos.

A mis pupilos, Dania, Alexia, Lucero y Uriel, por su apoyo en el laboratorio, y su bella amistad.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca recibida durante los estudios de maestría, han sido pieza clave para el desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xvi
SUMMARY	xviii
I. ANTECEDENTES	1
I.1 PROTECCIÓN JURÍDICA DE LOS SUELOS	2
I.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
I.3 JUSTIFICACIÓN	4
I.4 ANTECEDENTES	5
I.5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	15
I.5.1 Hipótesis	15
I.5.2 Objetivo general	15
I.5.3 Objetivos particulares	15
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	17
II.1 SUELO	18
II.1.1 Suelos expansivos	18
II.1.2 Propiedades química del suelo	19
II.1.2.1 Potencial de hidrógeno	19
II.1.2.2 Contenido de materia orgánica	19
II.1.2.3. Capacidad de intercambio catiónico	20
II.1.3 Superficie específica	21
II.1.4 Propiedades geotécnicas del suelo	22
II.1.4.1 Propiedades índice	22
II.1.4.2 Resistencia al esfuerzo cortante	23
II.1.4.3 Permeabilidad	24

ÍNDICE GENERAL

II.1.4.4 Curva de retención de humedad.....	24
II.2 COMBUSTIBLE FÓSIL.....	24
II.2.1 Suelo contaminado	26
II.3 REMEDIACIÓN DE SUELOS.....	27
II.3.1 Tecnología de tratamiento	27
II.3.2 Microorganismos en la estructura del suelo.....	27
II.3.3 Clasificación de las tecnologías de remediación	29
II.3.4 Biorremediación	30
II.3.4.1 Biopilas	34
II.3.4.1.1 Principios de operación.....	35
II.3.4.1.2 Diseño del sistema	38
II.3.4.1.3 Ventajas y limitantes de la tecnología de biopilas.....	38
II.3.4.2 Atenuación natural.....	39
II.3.4.2.1 Procesos de la atenuación natural.....	41
II.3.4.2.2 Ventajas y limitaciones de la atenuación natural	44
III. METODOLOGÍA	46
III.1 LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN DEL SUELO EN ESTUDIO	47
III.2 MUESTREO.....	47
III.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	48
III.3.1 Contaminación del agua	49
III.3.2 Biopilas	50
III.3.3 Atenuación natural.....	51
III.3.4 Caracterización química	52
III.3.4.1 Contenido de materia orgánica (MO) (ASTM D2974, 2013)....	52
III.3.4.1.1 Suelo natural.....	52
III.3.4.1.2 Suelo contaminado	53
III.3.4.2 pH (ASTM D4972, 2013)	53
III.3.4.2.1 Suelo natural.....	53
III.3.4.2.2 Suelo contaminado	54

ÍNDICE GENERAL

III.3.5 Superficie específica (ASTM C837-09, 2014).....	55
III.3.5.1 Suelo natural.....	55
III.3.5.2 Suelo contaminado	55
III.3.6 Caracterización geotécnica.....	56
III.3.6.1 Consideraciones de las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo con presencia de contaminante	56
III.3.6.2 Determinación del peso específico o peso volumétrico de la masa del suelo (γ_m) (ASTM D427, 2010).....	57
III.3.6.2.1 Suelo natural.....	57
III.3.6.2.2 Suelo contaminado	58
III.3.6.3 Contenido de humedad (ω) (ASTM D2216, 2010)	59
III.3.6.3.1 Suelo natural.....	59
III.3.6.4 Contenido de líquidos (I%) (Basado en ASTM D2216, 2010) .	60
III.3.6.4.1 Suelo contaminado	60
III.3.6.5 Peso específico relativo de sólidos (S_s) (ASTM D854, 2014) .	60
III.3.6.5.1 Suelo natural.....	60
III.3.6.5.2 Suelo contaminado	61
III.3.6.6 Análisis granulométrico vía seca (por tamices) (ASTM D6913- 1913M, 2017)	64
III.3.6.6.1 Suelo natural.....	64
III.3.6.7 Análisis granulométrico vía húmeda (por hidrómetro) (ASTM 422-63, 2007)	65
III.3.6.7.1 Suelo natural.....	65
III.3.6.7.2 Suelo contaminado	66
III.3.6.8. Límites de consistencia de Atterberg	67
III.3.6.8.1 Suelo natural.....	67
III.3.6.8.1.1 Límite líquido (LL) (Norma BS 1377-2:1990)	67
III.3.6.8.1.2 Límite plástico (LP) (ASTM D4318, 2017)	68
III.3.6.8.1.3 Índice plástico (IP) (ASTM D4318, 2017).....	69

ÍNDICE GENERAL

III.3.6.8.1.4 Contracción lineal (ASTM D4318, 2017).....	69
III.3.6.8.1.5 Límite de contracción (LC) (ASTM D427, 2010	70
III.3.6.8.2 Suelo contaminado	71
III.3.6.8.2.1 Límite líquido (LL) (Norma BS 1377-2:1990)	71
III.3.6.8.2.2 Límite plástico (LP) (ASTM D4318, 2017)	72
III.3.6.8.2.3 Contracción lineal (ASTM D4318, 2017).....	73
III.3.6.8.2.4 Límite de contracción (LC) (ASTM D427, 2010	73
III.3.6.9 Clasificación SUCS (ASTM D2487, 2014)	74
III.3.7 Resistencia al esfuerzo cortante (ASTM D3080/3080M, 2011) ..	75
III.3.9 Curva de calibración mediante el método de obtención del contenido de materia orgánica	76
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
IV.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	79
IV.1.1 pH y materia orgánica	79
IV.1.1.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	79
IV.1.1.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	80
IV.1.1.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	80
IV.1.2 Capacidad de intercambio catiónico.....	81
IV.1.2.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	81
IV.1.2.1 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	82
IV.1.2.1 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	82
IV.2 Superficie específica	83
IV.2.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	83
IV.2.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	83
IV.2.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	84
IV.3 Caracterización geotécnica	85

ÍNDICE GENERAL

IV.3.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas.....	85
IV.3.1.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	85
IV.3.1.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	86
IV.3.1.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	87
IV.3.2 Granulometría	89
IV.3.2.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	89
IV.3.2.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	91
IV.3.2.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	93
IV.3.3 Límites de consistencia	95
IV.3.3.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	95
IV.3.3.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	96
IV.3.3.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	97
IV.4 Resistencia al esfuerzo cortante	98
IV.4.1 Suelo natural vs suelo contaminado.....	98
IV.4.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas.....	101
IV.4.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural	103
IV.5 Control de tratamientos	105
IV.5.1 Suelo tratado mediante biopilas	105
IV.5.2 Suelo tratado mediante atenuación natural	106
IV.6 Curva de calibración para determinación de contenido de contaminantes	109
IV.6.1 Contenido de contaminantes de suelo tratado mediante biopilas	113
IV.6.2 Contenido de contaminantes de suelo tratado mediante atenuación natural	115

V. CONCLUSIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÉNDICES	
APÉNDICE A. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO	129
A.1 Contenido de humedad y materia orgánica en el suelo natural....	130
A.2 Contenido de líquidos y materia orgánica en el suelo contaminado	130
A.3 Determinación de fósforo en suelo contaminado	131
A.4 Contenido de líquidos y materia orgánica en el suelo tratado mediante biopilas	131
A.5. Contenido de líquidos y materia orgánica en el suelo tratado mediante atenuación natural	132
APÉNDICE B. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUELO	133
B.1 Suelo natural	134
B.1.1 Peso específico	134
B.1.2 Contenido de humedad	134
B.1.3 Peso específico relativo de sólidos	135
B.1.4 Granulometría	138
B.1.5 Límites de consistencia	147
B.2 Suelo contaminado.....	150
B.2.1 Peso específico	150
B.2.2 Contenido de líquidos.....	151
B.2.3 Peso específico relativo de sólidos	152
B.2.4 Granulometría	155
B.2.5 Límites de consistencia	164
B.3 Suelo tratado mediante biopilas	167
B.3.1 Peso específico	167
B.3.2 Contenido de líquidos.....	168
B.3.3 Peso específico relativo de sólidos	169

ÍNDICE GENERAL

B.3.4 Granulometría	172
B.3.5 Límites de consistencia	181
B.4 Suelo tratado mediante atenuación natural	184
B.4.1 Peso específico	184
B.4.2 Contenido de líquidos.....	185
B.4.3 Peso específico relativo de sólidos	186
B.4.4 Granulometría	189
B.4.5 Límites de consistencia	198
APÉNDICE C. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.....	201
C.1 Suelo natural	202
C.2 Suelo contaminado	203
C.3 Suelo tratado mediante biopilas.....	204
C.4 Suelo tratado mediante atenuación natural	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Caracterización del suelo antes y después de la contaminación experimental.	13
Tabla 1.2. Caracterización del suelo antes y después de la contaminación experimental.	14
Tabla 2.1. Capacidad de Intercambio Catiónico de las arcillas.	20
Tabla 2.2. Valores típicos para minerales de arcilla.	22
Tabla 2.3. Propiedades índice del suelo.	22
Tabla 2.4 Propiedades del diésel.	25
Tabla 2.5. Capacidad de biodegradación de algunos compuestos habituales.	32
Tabla 4.1. Contenido de materia orgánica y pH del estado natural vs contaminado del suelo.	79
Tabla 4.2. Contenido de materia orgánica y pH del estado contaminado vs biopilas del suelo.	80
Tabla 4.3. Contenido de materia orgánica y pH del estado contaminado vs atenuación natural del suelo.	80
Tabla 4.4. Capacidad de intercambio catiónico del estado natural vs contaminado del suelo.	81
Tabla 4.5. Capacidad de intercambio catiónico del estado contaminado vs biopilas del suelo.	82
Tabla 4.6. Capacidad de intercambio catiónico del estado contaminado vs atenuación natural del suelo.	82
Tabla 4.7. Superficie específica en el estado natural vs contaminado del suelo.	83
Tabla 4.8. Superficie específica en el estado contaminado vs biopilas del suelo.	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.9. Superficie específica en el estado contaminado vs atenuación natural del suelo.	84
Tabla 4.10. Relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo natural vs contaminado.	86
Tabla 4.11. Relaciones volumétricas y gravimétricas del estado contaminado vs biopilas.	87
Tabla 4.12. Relaciones volumétricas y gravimétricas del estado contaminado vs atenuación natural del suelo.	88
Tabla 4.13. Granulometría en los estados natural vs contaminado del suelo.	89
Tabla 4.14. Granulometría en los estados contaminado vs biopilas del suelo.	91
Tabla 4.15. Granulometría en los estados contaminado vs atenuación natural del suelo.	93
Tabla 4.16. Límites de consistencia en los estados natural vs contaminado del suelo.	95
Tabla 4.17. Límites de consistencia en los estados contaminado vs biopilas del suelo.	96
Tabla 4.18. Límites de consistencia en los estados contaminado vs atenuación natural del suelo.	97
Tabla 4.19. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo en el estado natural vs contaminado del suelo.	101
Tabla 4.20. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo en el estado contaminado vs biopilas del suelo.	102
Tabla 4.21. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo en el estado contaminado vs atenuación natural del suelo.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Contaminantes involucrados en emergencias ambientales 2008-2013. Información hasta el mes de mayo 2013.	7
Figura 2.1. Partícula prismática de suelo.	21
Figura 2.2. Resistencia al esfuerzo cortante mediante corte directo.	23
Figura 2.3. Diseño de una biopila temporal.	34
Figura 2.4. Procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la atenuación natural de los contaminantes.	41
Figura 3.1. Localización geográfica del sitio de muestreo del suelo en estudio	47
Figura 3.2. Metodología realizada en el proyecto de investigación.	49
Figura 3.3. Proceso de contaminación del suelo.	50
Figura 3.4. Proceso de remediación mediante biopilas.	50
Figura 3.5. Proceso de remoldeo para remediación mediante atenuación natural.	51
Figura 3.6. Determinación del contenido de materia orgánica.	52
Figura 3.7. Determinación del contenido de materia orgánica en suelo con contaminante.	53
Figura 3.8. Determinación del pH del suelo.	54
Figura 3.9. Determinación de la superficie específica del suelo.	55
Figura 3.10. Determinación de la superficie específica del suelo con contaminante.	56
Figura 3.11. Fases del suelo.	57
Figura 3.12. Determinación del peso específico del suelo.	58
Figura 3.13. Determinación del contenido de humedad del suelo.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.14. Determinación del peso específico relativo de sólidos del suelo.	61
Figura 3.15. Mezcla de agua destilada, contaminante y suelo generada en el matraz.	62
Figura 3.16. Espuma generada en la línea de aforo del matraz.	63
Figura 3.17. Determinación del peso específico relativo de sólidos en suelo con contaminante.	64
Figura 3.18. Análisis granulométrico por tamizado.	65
Figura 3.19. Análisis granulométrico por hidrómetro.	66
Figura 3.20. Espuma generada durante la prueba de hidrómetro.	66
Figura 3.21. Testigos de humedad de límites de consistencia.	67
Figura 3.22. Determinación del límite líquido mediante cono inglés.	68
Figura 3.23. Determinación del límite plástico.	69
Figura 3.24. Determinación del límite de contracción lineal.	70
Figura 3.25. Determinación del límite de contracción volumétrica.	71
Figura 3.26. Expulsión de contaminante de la muestra contaminada durante la determinación del límite líquido.	72
Figura 3.27. Determinación de límite de contracción lineal en suelo con contaminante	73
Figura 3.28. Determinación del límite de contracción volumétrica en suelo con contaminante.	74
Figura 3.29. Carta de plasticidad de Casagrande.	75
Figura 3.30. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.31. Material contaminado en diferentes porcentajes con respecto a peso seco del suelo.	77
Figura 4.1. Promedios de granulometría en los estados natural vs contaminado del suelo.	90
Figura 4.2. Promedios de granulometría en los estados contaminado vs biopilas del suelo.	92
Figura 4.3. Promedios de granulometría en los estados contaminado vs atenuación natural del suelo.	94
Figura 4.4. Gráfico deformación-esfuerzo cortante en el estado natural (NC) vs contaminado del suelo (C).	99
Figura 4.5. Envolvente de falla del suelo en el estado natural (NC) vs contaminado del suelo (C).	100
Figura 4.6. Gráfico deformación-esfuerzo cortante en el estado contaminado (C) vs biopilas del suelo (BP).	101
Figura 4.7. Gráfico esfuerzo confinante-esfuerzo cortante en el estado contaminado (C) vs biopilas del suelo (BP).	102
Figura 4.8. Gráfico deformación-esfuerzo cortante en el estado contaminado (C) vs atenuación natural del suelo (AN).	103
Figura 4.9. Envolvente de falla del suelo en el estado contaminado (C) vs atenuación natural del suelo (AN).	104
Figura 4.10. Comportamiento de la temperatura respecto al tiempo durante el tratamiento de biopilas.	105
Figura 4.11. Comportamiento del pH respecto al tiempo en el tratamiento de biopilas.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.12.	Comportamiento de la temperatura respecto al tiempo durante el tratamiento de atenuación natural.	107
Figura 4.13.	Comportamiento del pH respecto al tiempo en el tratamiento de atenuación natural.	108
Figura 4.14.	Perdidas por secado en horno a 110° C.	109
Figura 4.15.	Coeficiente de contenido de agua para pérdidas a 110°C.	110
Figura 4.16.	Perdidas por secado en horno a 165° C.	111
Figura 4.17.	Coeficiente de contenido de agua para pérdidas a 110°C.	111
Figura 4.18.	Pérdidas por secado en horno+mufla.	112
Figura 4.19.	Pérdidas por secado en horno a 110 °C.	113
Figura 4.20.	Pérdidas por secado en horno a 165 °C.	114
Figura 4.21.	Contenido de materia orgánica.	114
Figura 4.22.	Pérdidas por secado a 110 °C.	115
Figura 4.23.	Contenido de materia orgánica.	116

México es un país productor de petróleo, y se ha visto beneficiado por la industria pero también ha reportado problemas ambientales debido a esta. Una de las principales causas de estos problemas es la afectación de sitios por derrame de hidrocarburos. El suelo posee ciertas propiedades cualitativas fáciles de medir, que son el primer acercamiento hacia los suelos, y mediante estas se puede inferir un comportamiento más complejo del mismo, estas se denominan propiedades índice. Cuando el suelo se ve afectado por hidrocarburos, sus propiedades geotécnicas, químicas o biológicas se ven modificadas y resulta necesario aplicar tratamientos de remediación para la limpieza de este. Para la investigación, se aplicaron dos métodos de biorremediación: atenuación natural y biopilas, que consisten en los procesos naturales de la atenuación del suelo y la adición de nutrientes, minerales, aireación al suelo para así estimular la actividad microbiana aerobia presente en los suelos. Para analizar el efecto de estos métodos de biorremediación en las propiedades geotécnicas del suelo, se contaminó un suelo natural y se procedió a su remediación mediante estos. Las propiedades a analizar fueron determinadas mediante los procedimientos descritos en las normativas de la *ASTM*; mismas que fueron modificadas para la caracterización del suelo con contaminante. Se observó que las propiedades geotécnicas del suelo tratado mediante atenuación natural y biopilas se ven modificadas con respecto a su condición en estado contaminado, sin regresar a las condiciones naturales del suelo. La clasificación del suelo no contaminado es MH-CH la cual se mantiene constante en el suelo contaminado y en el suelo tratado mediante atenuación natural, sin embargo, el suelo tratado mediante biopilas presenta una caracterización SW-MH, dejando de lado a las arcillas como material principal. La resistencia al esfuerzo cortante del suelo con presencia de contaminante se ve modificado aumentando el ángulo de fricción y reduciendo la cohesión del suelo, es decir, la resistencia al esfuerzo cortante aumentada a mayores esfuerzos de confinamiento, en sus diferentes estados con contaminante.

RESUMEN

(**Palabras clave:** geotecnia ambiental, propiedades geotécnicas, diésel, suelo contaminado, hidrocarburo)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

SUMMARY

Mexico is an oil producing country, and has benefited from the industry but has also reported environmental problems due to it. One of the main causes of these problems is the affectation of oil spill sites. The soil has certain qualitative properties easy to measure, which are the first approach to soils, and through these can infer a more complex behavior of it, these are called index properties. When the soil is affected by hydrocarbons, its geotechnical, chemical or biological properties are modified and it is necessary to apply remediation treatments to clean it. For the investigation, two methods of bioremediation were applied: natural attenuation and biopiles, which consist of the natural processes of soil attenuation and the addition of nutrients, minerals, aeration to the soil in order to stimulate the aerobic microbial activity present in the soil. In order to analyze the effect of these bioremediation methods on the geotechnical properties of the soil, a natural soil was contaminated and remediated. The properties to be analyzed were determined by means of the procedures described in the ASTM regulations, which were modified to characterize the soil with contaminant. It was observed that the geotechnical properties of soil treated by natural attenuation and biopiles are modified with respect to their condition in the contaminated state, without returning to the natural conditions of the soil. The classification of the unpolluted soil is MH-CH which is kept constant in the polluting soil and in the soil treated by natural attenuation, however, the soil treated by biopiles presents a SW-MH characterization, leaving clays aside as the main material. The shear strength of soil with contaminant is modified by increasing the angle of friction and reducing soil cohesion, i.e., the shear strength increased at higher confinement stresses, in its different contaminant states.

(Key words: environmental geotechnics, geotechnical properties, diesel, contaminated soil, hydrocarbon)

Capítulo I

ANTECEDENTES

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Protección jurídica de los suelos

La falta de un marco normativo específico que regulara el manejo y derrame de materiales y residuos peligrosos durante el crecimiento de la industria, permitió que se generaran una gran cantidad de sitios contaminados por tales materiales. En México, desde sus inicios en los años 1980 y hasta la actualidad, existe una regulación con el objetivo de atender la problemática de suelos contaminados (SEMARNAT, 2016).

La ley ambiental marco, Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), considera entre sus bases la prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo. Así mismo, señala que el instrumento de política ambiental es el Ordenamiento Ecológico del Territorio. Dicho instrumento se articula a través de Programas de Ordenamiento Ecológico (POE). Uno de los fines de estos programas, es la búsqueda del equilibrio entre los asentamientos humanos y la protección del suelo (Tejado, 2014).

“[...] IV. En las acciones de preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, deberán considerarse las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natral; V. en las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse a cabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas, y VI. La realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural [...]” (Suprema Corte de Justicia de la Nación, 2012).

Aunado al mandato legal, existen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes. Las Normas Oficiales Mexicanas que regulan la gestión de los sitios contaminados son: 1) NOM-147-SEMARNAT/SS-2004, la cual

establece criterios para determinar la concentración de remediación de suelos por metales; 2) NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece características, procesos de identificación y clasificación de residuos peligrosos; 3) Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación; 4) NOM-021-SEMARNAT-2000, establece las especificaciones de clasificación de suelo, estudio, análisis y muestreo; y la 5) NOM-133-SEMARNAT-2015 sobre protección ambiental y especificaciones de manejo de suelos contaminados (SEMARNAT, 2016) y (DOF, 2004).

Como complemento de las NOM para la gestión de suelos contaminados y de carácter voluntario, se presentan las Normas Mexicanas (NMX), las cuales se convierten en obligatorias al ser referidas en una NOM. Las propias para uso en suelos contaminados por hidrocarburos son: 1) NMX-AA-134-SCFI-2006 referente a los métodos de prueba para la fracción de pesada de hidrocarburos en suelos; 2) NMX-AA-145-SCFI-2008 que determina los métodos de prueba de la fracción media de los hidrocarburos presentes en los suelo; 3) NMX-AA-146-SCFI-2014 que describe los métodos de prueba para los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en suelos contaminados por hidrocarburos; 4) NMX-AA-105-SCFI-2014, la cual describe los métodos de prueba de la fracción ligera de los hidrocarburos en el suelo y 5) NMX-AA-141-SCFI-2014 para métodos de prueba referentes a hidrocarburos aromáticos BTX (formados por benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos). Adicionalmente, para el análisis de suelos contaminados con metales y metaloides, se cuenta con la norma NMX-AA-132-SCFI-2016, que describe el muestreo de suelos para identificación y cuantificación de contaminantes presentes y el manejo de la muestra (SEMARNAT, 2016) y (DOF, 2004).

Planteamiento del problema

Por ser México un país productor de petróleo, gran parte de las actividades industriales que se realizan están orientadas a la exploración, producción,

explotación, refinado, almacenamiento y distribución de hidrocarburos. Lo mencionado anteriormente aumenta las posibilidades de derrames.

Las fugas y derrames de hidrocarburos se han convertido en una gran preocupación en los países productores y consumidores de petróleo alrededor del mundo. El impacto de estas fugas y derrames en el ambiente no se debe despreciar. Uno de los impactos que provoca la contaminación del suelo con hidrocarburos es el cambio en las propiedades de ingeniería y el comportamiento de los suelos (Saval, 1999). Esos cambios pueden dar como resultado una falla estructural o funcional de las estructuras existentes, especialmente cuando la contaminación provoca un aumento significativo en la plasticidad del suelo, pérdida de su capacidad de carga, aumenta su asentamiento y/o evita el drenaje de agua u otro líquido (State, 2014).

Aunque existen diversos estudios de la influencia de los hidrocarburos derramados en diversos tipos de suelos (Rahman et al., 2010, Izdebska-Mucha y Trzcinski, 2008, Shin y Das ,2001) y el cambio en las propiedades químicas de éstos, la información existente respecto a la afectación en el comportamiento geotécnico de los suelos contaminados y remediados es muy escasa, por lo que es necesario indagar en el análisis de la remediación de estos suelos y los cambios en su comportamiento geotécnico, obteniendo resultados que nos permita identificar el método de remediación más viable que permita justificar, desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica, la elección de alguna de estas técnicas de acuerdo a las características del suelo contaminado a remediar.

Justificación

En México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, que establece los criterios de remediación para sitios contaminados con hidrocarburos, así como con la guía técnica de orientación para la planeación y realización de muestreos finales comprobatorios (Rocha y Ruíz, 2012). Desafortunadamente, la normatividad ambiental aplicable y las metodologías

de remediación de los sitios contaminados sólo consideran la variable ambiental y no se considera su efecto en las propiedades geotécnicas del suelo.

La búsqueda bibliográfica realizada mostró que el suelo sufre cambios en su estructura debido a las actividades de remediación (Pérez, Iturbide, y Flores, 2006). Esto podría tener repercusiones en las propiedades geotécnicas de los suelos remediados, lo cual podría condicionar su reúso en los proyectos de ingeniería. Por lo tanto, en este estudio se propone el uso de dos métodos de biorremediación (biopilas y atenuación natural) de un suelo contaminado con diésel, con la intención de comparar el efecto que tienen dichas metodologías en las propiedades geotécnicas del suelo remediado.

Antecedentes

La industria petroquímica en México se ha desarrollado aceleradamente, generando diversos satisfactores económicos. Sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con graves repercusiones a la salud de la población y al equilibrio ecológico de los ecosistemas (Azuela *et al.*, 1993).

La industria del petróleo ha sido una actividad económica significativa en México; sin embargo, la exploración en busca del petróleo, sus procesos de almacenamiento, transporte y refinación han generado impactos en la dinámica de los ecosistemas y en el suelo en particular, ocasionando cambios en sus características físicas, químicas y biológicas (Muskus *et al.*, 2013).

Los sitios afectados por hidrocarburos se deben, en buena medida, a un mayor número de tomas clandestinas registradas en el Sistema Nacional de Ductos. Durante 2016 se presentaron 192 eventos de fugas y derrames, cifra menor en 8% al año 2015. Sin embargo, el volumen de hidrocarburos derramado fue de 6 956 barriles más en comparación al año anterior (PEMEX, 2016).

Los sitios contaminados pueden definirse como el lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas (DOF, 2003; Semarnat, 2014).

Entre las principales causas que pueden provocar la contaminación de un sitio están (Semarnat, 2012):

- 1) La disposición inadecuada de los residuos en terrenos baldíos, bodegas, almacenes y patios de las industrias.
- 2) Fugas de materiales o residuos peligrosos de tanques y contenedores subterráneos, tuberías y ductos, así como de alcantarillados y drenajes industriales o públicos.
- 3) Lixiviación de materiales en sitios de almacenamiento y donde se desarrollan actividades productivas, o bien, de rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.
- 4) Derrames accidentales de sustancias químicas durante su transporte.
- 5) Aplicación de sustancias químicas potencialmente tóxicas en el suelo, instalaciones y edificaciones.
- 6) La descarga de aguas residuales que contienen residuos peligrosos y sustancias químicas potencialmente tóxicas sin tratamiento previo.

La SEMARNAT clasifica a los sitios contaminados en dos tipos: por un lado, los denominados pasivos ambientales, de grandes dimensiones y con obligación de remediación, con problemas causados por el uso industrial del suelo y el manejo inadecuado de los residuos peligrosos y que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de los contaminantes. Esta categoría incluye además la contaminación generada por una emergencia que tenga efectos a largo plazo sobre el medio ambiente. En segundo lugar, se encuentran los sitios contaminados causados por emergencias ambientales (EA), cuya atención ocurre cuando la

contaminación del sitio deriva de una circunstancia o evento, indeseado o inesperado, que ocurre repentinamente y que tiene como resultado la liberación no controlada, incendio o explosión de uno o varios materiales que afectan la salud humana o el medio ambiente de manera inmediata (Semarnat, 2012).

Entre 2008 y 2013, se identificaron 627 sitios contaminados por emergencias ambientales, cuyos responsables involucrados en mayor porcentaje fueron los transportistas con 456 emergencias (72.7% del total registrado), seguidos por Pemex con 127 (20.3%) y por los ferrocarriles (1.9%).

Los contaminantes acumulados e involucrados en las emergencias ambientales en el periodo 2008-2013 fueron: la gasolina magna con 171 emergencias (27.3% del total), le sigue el diésel con 141 emergencias (22.5%), el combustóleo con 98 emergencias (15.6%), la turbosina con 36 emergencias (5.7%) y otros contaminantes como ácidos y bases con 32 emergencias (5.1%). Vea la Figura 1.1.

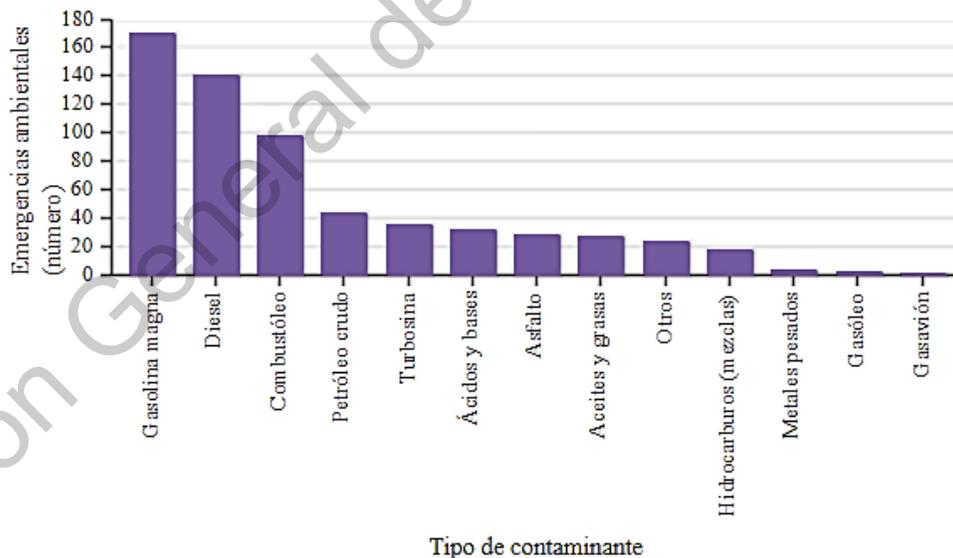


Figura 1.1. Contaminantes involucrados en emergencias ambientales 2008-2013. Información hasta el mes de mayo 2013.

Fuente: Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental Semarnat, 2013.

Para 2013, las entidades con mayor presencia de sitios identificados y acumulados como contaminados fueron Veracruz (69 sitios), Querétaro (58 sitios), Guanajuato (48 sitios), Colima (38 sitios) estado de México (36 sitios), Michoacán (34 sitios) y Aguascalientes (31 sitios).

La contaminación del suelo con hidrocarburos ha llamado la atención de los investigadores en todo el mundo debido a la modificación de las propiedades geotécnicas de los suelos, lo cual no solo pone en riesgo la integridad de las estructuras desplantadas sobre ellos, sino que también se compromete la integridad de sus usuarios (Shin y Das, 2001).

Rahman et al. (2010) investigaron la influencia en las propiedades geotécnicas de un suelo residual basáltico contaminado con aceite de motor, y concluyen que el aceite tiene una influencia similar al del agua en el suelo, permitiendo un comportamiento de mayor deslizamiento interparticular, lo cual explica, para ellos, que los límites de Atterberg decrecieran entre un 20% y un 40%, la densidad que descendió de 1.67 ton/m³ a 1.57 ton/m³, el contenido de humedad, permeabilidad, resistencia al corte y la cohesión, propiedades índices, del suelo contaminado, decayeran en comparativa con la caracterización del suelo natural. Por otro lado, Izdebska-Mucha y Trzcinski (2008) investigaron el efecto de la contaminación con diésel en los cambios micro-estructurales del suelo arcilloso. Ellos encontraron que se produjeron cambios micro-estructurales sustanciales: empaquetamiento relativamente suelto de partículas de arcilla, es decir, que su índice de vacíos es alto, como consecuencia presenta poca compacidad relativa. Esto se debe a la no polaridad del diésel, que al estar caracterizado por un bajo valor de constante dieléctrica genera una reducción en el espesor de la doble capa difusa, según los principios de dicha teoría

State (2014) dividió una muestra de suelo en seis partes y les añadió petróleo crudo en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, en peso seco de la muestra de suelo, respectivamente. Esto dio como resultado un aumento en el límite líquido,

el límite plástico y el índice de plasticidad del suelo contaminado, aumentando el último de un 40% a 60%, aproximadamente.

De acuerdo con Shin y Das (2001), la contaminación del suelo con aceite de motor usado es común en todos los talleres de mecánica de motores. Se ha informado que la capacidad de carga de tales suelos se reduce drásticamente, la capacidad del suelo sin contaminante es de 38 kN/M², mientras que para un suelo contaminado con 6% de aceite de motor, petróleo crudo o queroseno, la capacidad de carga calculada es de 14 kN/M², 16 kN/M² y 19 kN/M², respectivamente, lo que hace que las estructuras de ingeniería no sean seguras y que el crecimiento de las plantas se ve reducido por la baja disponibilidad de nutrientes y/o la acumulación de elementos tóxicos en el suelo.

Ijimdiya (2013) estudió un suelo tomado de un pozo en Shika, en Zaria, perteneciente al grupo de suelos tropicales ferruginosos derivados de rocas ácidas y metamórficas ácidas. Este autor observó que la presencia de petróleo en el suelo laterítico condujo a la reducción en los valores de resistencia a la compresión simple y la relación de vacíos y el aumentó el coeficiente de compresibilidad (M_v) y el coeficiente de consolidación (CV). Los resultados mostraron claramente que la contaminación con petróleo aumentó el M_v 48 veces su valor, el CV en aproximadamente 6 veces más, y el porcentaje de finos disminuyó de un 86.9% hasta un 1.4%, resultando así una influencia negativa grave sobre las propiedades geotécnicas de los suelos, los cuales resultaron inadecuados para fines de ingeniería, por lo que se requiere remediarlos o estabilizarlos para mejorar la capacidad de soporte del suelo afectado.

Se sabe que pueden ocurrir cambios importantes en las propiedades geotécnicas de los suelos en un entorno químico agresivo. Las propiedades geotécnicas del suelo contaminado, como la resistencia al corte y la conductividad hidráulica, también se modifican. Oyegbile y Ayininuola (2013) encontraron, a partir de los resultados de las pruebas de resistencia al corte, una reducción en el índice plástico de 39.2% a 27.4%, lo que se traduce en un decrecimiento de la cohesión de 51

kN/m² a 44 kN/m² y de 14° a 11° respecto al ángulo de fricción interna debido a la acción del petróleo crudo en la muestra laterítica de suelo que evaluaron.

Martínez y López (2001) realizaron pruebas con un suelo arcilloso contaminado con diésel, gasolina y combustóleo, y concluyeron que si bien los tres contaminantes aumentan el contenido de materia orgánica en el suelo, el diésel causa el mayor cambio con un 347% de incremento. El pH del suelo, ante los tres contaminantes, no se ve modificado y la conductividad hidráulica del material contaminado tiene una variación no uniforme para los distintos tipos y contenidos de contaminante (0-150,000 mg/kg).

Khosravi *et al.* (2013) evaluaron el efecto de la contaminación de una caolinita con gasóleo a diferentes concentraciones de contaminante (p. ej., 2%, 4%, 6%, 12%, 16% y 20%, obtenido como un porcentaje en peso de la caolinita seca). Sus resultados indican un aumento en la cohesión y una disminución tanto en el ángulo de fricción como en la compresibilidad de los suelos caoliníticos al aumentar el contenido de gasóleo.

En 2018, Safehian *et al.*, realizaron pruebas de corte directo a una illita contaminada con diésel (0% a 20% en peso seco). En este estudio ellos determinaron que la adición de contenido de diésel redujo la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo. Las micrográficas realizadas revelaron que las moléculas de diésel rodean las partículas de arcilla y actúan individualmente. Por lo tanto, tienden a comportarse como una arena y reduce la resistencia al corte de la illita.

Hasta la fecha, los investigadores se han esforzado en estudiar el efecto de los contaminantes en la masa de suelo. No obstante, para que los suelos contaminados se puedan reutilizar es necesario que estos sean remediados. Suponiendo que se cumplan las pautas para la remediación de los suelos contaminados con petróleo, estos se podrían usar en aplicaciones tales como: materiales de construcción para

terraplenes, material base o agregado de asfalto para la construcción de carreteras y cobertura diaria de rellenos sanitarios (Khosravi *et al.*, 2013).

Para llevar a cabo las acciones conducentes a la remediación ambiental de los sitios contaminados se requiere tener conocimiento de la ecología microbiana, de los ciclos biogeoquímicos y de las limitaciones, tanto termodinámicas como estequiométricas, de sus etapas (Wackett y Bruce, 2014).

Asimismo, existen numerosas tecnologías de remediación de suelos contaminados y de acuerdo con Volke y Velasco (2002) se pueden agrupar en 3 tipos: biológicos, fisicoquímicos y térmicos. Antes de considerar el uso de una tecnología de remediación, es indispensable contar con información del sitio a remediar y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar. Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento (Sepúlveda y Trejo, 2002).

Couto *et al.* (2013) indican que el derrame de hidrocarburos puede ser responsable de daños ambientales severos y se deben tomar procedimientos de remediación para restaurar la calidad del suelo. La remediación del suelo contaminado mediante la técnica de lavado se usa ampliamente con aditivos avanzados para mejorar la eficiencia del mismo.

Sanscartier *et al.* (2010) trataron un suelo contaminado con hidrocarburos, en el norte de Canadá, por medio de biopilas durante un año y lograron reducir significativamente la concentración de n-alcanos en el suelo.

Roldán e Iturbide (2002) describieron el diseño, construcción y operación de una biopila para el saneamiento de un suelo contaminado con hidrocarburos, en una Terminal de Almacenamiento y Distribución, con una concentración promedio de hidrocarburos totales (HTP) de 21 000 mg/kg y un volumen de suelo a sanear de 5, 323 m³. Durante el tratamiento no se generaron subproductos que requirieran un procedimiento especial, el tiempo de tratamiento comparado con otros sistemas

biológicos fue relativamente corto (aproximadamente 6 meses) y resultó económicamente viable (aproximadamente 700 \$/m³ de suelo tratado).

Decesaro *et al.* (2016) compararon la eficiencia de remoción del diésel y del biodiésel en una muestra de suelo mediante la técnica de bioestimulación y de atenuación natural. La mayor biodegradación (88.75%) se logró utilizando phycocyanin como bioestimulante para la contaminación por biodiésel. La atenuación natural resultó en una menor evolución de CO₂ de 386.5 mg C-CO₂ y 282.5 mg C-CO₂ para biodiésel y diésel, respectivamente, y tasas de biodegradación de 42.4% y 31.3% para biodiésel y diésel, respectivamente.

Zytner *et al.* (2001) estudiaron un campo contaminado ubicado al norte de Ontario, Canadá. Este sitio se contaminó con diésel a lo largo de los años por las operaciones que se llevaban a cabo en él. Las tasas de degradación de laboratorio y campo se cuantificaron con base en las concentraciones de HTP y algunos componentes individuales, así como por el consumo de O₂ y el monitoreo de la evolución del CO₂. La pérdida del 21% de HTP que se midió en el campo se atribuyó al resultado de la biodegradación del contaminante, con una volatilización mínima y una lixiviación insignificante. Los datos de O₂ y CO₂ concordaron con este porcentaje de biodegradación.

Anza *et al.* (2016) realizaron la biorremediación de un suelo contaminado con aceites usados de talleres de servicio automotriz mediante biopilas. Estos autores lograron porcentajes de remoción de la fracción alifática del 93.7% al 87.1% y en la fracción aromática de 0% al 94.8% en 90 días de tratamiento.

Corona-Ramírez e Iturbe-Argüelles (2005) realizaron un experimento con suelo contaminado proveniente de una refinería, el cual contaba con hidrocarburos derivados de petróleo. El estudio consistió en preparar 7 cajones con 7 kg de suelo cada uno. La experimentación consistió en airear el suelo diariamente y controlar el contenido de agua de manera que éste fuera constante. Los resultados mostraron un 90% de degradación en los hidrocarburos aromáticos policíclico (HAP), siendo

el alto contenido de agua (30%) un factor importante para favorecer la tasa de degradación en un período menor.

Gallo *et al.* (2012) evaluaron la remediación de suelos contaminados con diésel mediante bioestimulación y bioaumentación. Los ensayos se realizaron con muestras de suelo obtenido de un lugar con historial de contaminación. Los resultados sugieren que una adecuada aplicación de nutrientes contribuye al desarrollo de la población microbiana en el suelo con capacidad de degradar diésel, aumentando así la efectividad del proceso.

Gómez *et al.* (2009), realizaron la biorremediación de un suelo contaminado con la mezcla de combustible gasolina-diésel, para evaluar la bioestimulación (C) frente a la atenuación natural (B) y la bioaumentación (D), con respecto de un suelo de control (A) y el suelo natural. La reducción en la concentración de los HTP en un periodo de tres meses fue de 52.79%, 60.45% y 64.92% respectivamente. Las modificaciones en las propiedades fisicoquímicas se muestran en la tabla 1.1, donde se observa que para el suelo de control la granulometría se ve aumentada en el porcentaje de arena y limos, mientras que el pH se ve acidificado. Por otro lado, en los tratamientos de biorremediación el porcentaje de limos y arcilla se mantiene constante, mientras que las arenas se ven ligeramente aumentadas. El pH en tratamiento de atenuación natural se mantiene ácido, mientras que para la bioestimulación y bioaumentación el pH se neutraliza. Respecto a la materia orgánica, se ve aumentada para todos los casos.

Tabla 1.1. Caracterización del suelo antes y después de la contaminación experimental.

Parámetro medido	Suelo natural	Valores por tratamiento			
		A	B	C	D
Arena (%)	20	56	26	28	26
Limo (%)	28	42	24	26	24
Arcilla (%)	52	2	50	46	50
pH	5,4	2.6	5.3	7.6	7.4

Materia orgánica (%)	3,6	4.9	5.9	5.5	5.0
----------------------	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente: Adaptado de Gómez et al., 2009.

Arrieta *et al.*, (2012) realizaron un derrame experimental de diésel sobre un suelo de pastoreo, en el cual hicieron uso de dos tecnologías de biorremediación: atenuación natural y bioestimulación. En cuanto a la caracterización fisicoquímica del suelo arcilloso, antes y después de su remediación, se presentaron modificaciones en el pH y el contenido de materia orgánica (tabla 1.2). El pH se mantiene ácido aun después del proceso de atenuación natural mientras que para el proceso de bioestimulación se observa un pH neutro. La materia orgánica sin embargo, se ve aumentada con respecto del suelo natural, pero disminuida con respecto del suelo en estado de contaminación inicial.

Tabla 1.2.-Caracterización del suelo antes y después de la contaminación experimental.

Características	Antes del derrame	Después del derrame	Respirometría		
			Control	Atenuación	Bioestimulación
pH	5,5	5,6	4,3	5,4	7,7
Materia orgánica %	4,2	10,7	7,4	7.9	7,3

Fuente: Adaptado de Arrieta et al., 2012.

Se evalúa el cambio de algunas propiedades físicas del suelo en un sitio ubicado en San Agustín Tlaxco, Puebla, el cual se contaminó debido a un derrame de gasolina Nova y posteriormente se remedió a través de la técnica de venteo y biorremediación. Los resultados obtenidos indicaron la existencia de diferencias significativas en las propiedades medidas. Debido a que la densidad real y la porosidad están en función de las cantidades de partículas en el suelo, su tamaño y su arreglo, el arreglo de las partículas se alteró como consecuencia de los movimientos de tierra durante el muestreo y los procesos aplicados, y por consiguiente se ven alteradas las propiedades mencionadas. (Pérez, Iturbide, y Flores, 2006).

Con base en el acervo disponible, se puede concluir que, si bien hay estudios biológicos y químicos de la modificación físico-química en suelos contaminados y remediados, el análisis geotécnico en dichos suelos es escaso. Aunando a la repercusión de las propiedades índice de los suelos para el ejercicio de la ingeniería geotécnica, y el aumento de la contaminación de ellos, es indispensable conocer la modificación de dichas propiedades durante esta etapa, después de la mejora de estos y los métodos óptimos para la remediación de suelos. Es en este punto donde radica la importancia de la presente investigación.

Hipótesis y Objetivos

Cada método de remediación de suelos contaminados posee características y procedimientos que lo diferencian entre toda la gama de alternativas existentes, esto hace que la estructura del suelo se modifique en función del método de remediación empleado.

Hipótesis

La aplicación de los métodos de biopilas y atenuación natural para la remediación de un suelo influye en el mejoramiento de sus propiedades geotécnicas respecto a su condición en estado contaminado.

Objetivo General

Comparar el efecto que tiene el método de remediación de un suelo fino contaminado con diésel, mediante la aplicación del método de biopilas y atenuación natural, medido a través de sus propiedades geotécnicas.

Objetivos Particulares

- ✚ Determinar el efecto en las propiedades geotécnicas de un suelo fino contaminado con diésel, respecto a su condición en estado natural.

- ✚ Evaluar el impacto en las propiedades geotécnicas de un suelo fino remediado mediante el método de biopilas, con relación a su comportamiento en estado contaminado.
- ✚ Determinar la afectación de las propiedades geotécnicas de un suelo fino remediado mediante el método de atenuación natural, en comparación con su comportamiento en estado contaminado.

Dirección General de Bibliotecas UNQ

Capítulo II

FUNDAMENTACIÓN

TEÓRICA

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Suelo

El suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas (Das, 2015). Se trata de un sistema formado por componentes minerales, componentes orgánicos (humus y derivados, biomasa viva y muerta), gas (aire en el espacio existente en los poros), y agua envolviendo partículas y el espacio capilar (Otero *et al.*, 2010).

Suelos expansivos

Donalson (1969) clasificó en dos grupos los materiales que pueden dar origen a los suelos expansivos. El primer grupo comprende las rocas ígneas básicas, como los basaltos y los gabros. En los suelos expansivos los minerales como el feldespato y el piroxeno de las rocas madre, se descomponen para formar la montmorillonitas y otros minerales secundarios.

El segundo grupo comprende las rocas sedimentarias que contienen montmorillonita como constituyente, el cual se desintegra mecánicamente para formar suelos expansivos.

La ciudad de México tiene fama mundial por sus problemas de asentamientos lo cual ha motivado investigación abundante por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), relacionada con los suelos blandos que le caracterizan, depósitos lacustres en los que se encuentra la capital mexicana. Por otro lado las arcillas expansivas en México han sido estudiadas, principalmente, por investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro, desde hace dos décadas (Zepeda Garrido, 2004).

Propiedades químicas del suelo

Potencial de hidrógeno

El pH (potencial de hidrógeno) es una propiedad química esencial de los suelos, que determina tanto el comportamiento y la evolución de los componentes químicos de estos como los correspondientes a los seres vivos.

Determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo es ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad y disponibilidad, de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos tienden a presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos (FAO, 2019).

Contenido de materia orgánica

La suma de todos los materiales de origen vegetal y animal encontrados en el suelo o en su superficie, independientemente de que se encuentren vivos, muertos o en descomposición se define como materia orgánica (Pereira *et al.*, 2011).

La materia orgánica en el suelo también facilita los mecanismos de absorción de sustancias peligrosas como los plaguicidas (Pereira *et al.*, 2011).

La materia orgánica juega un papel importante en la alteración química del suelo, proceso en el cual se da una pérdida celular y una alteración de la composición de material original. Para eso, es fundamental la relación Carbono/Nitrógeno de los restos vegetales, ya que los microorganismos obtienen del carbono (C) su energía y el nitrógeno lo utilizan para incorporarlo a su protoplasma. Cuando la relación C/N es alta (alrededor del 100), se acidifica el material y la actividad microbiana se ve reducida. Cuando la relación C/N es baja, la actividad microbiana se vuelve intensa (Pereira *et al.*, 2011).

El contenido de materia orgánica del suelo se relaciona positivamente, en algunos casos, con la superficie específica del mismo, a mayores contenidos de materia orgánica, se observa una mayor superficie específica (Gelati *et al.*, 2009).

Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), se refiere a la cantidad total de cargas negativas que están disponibles sobre la superficie de las partículas en el suelo.

Es un indicador del potencial del suelo para retener e intercambiar nutrientes vegetales, mediante la estimación de su capacidad para retener cationes (sustancias de carga positiva). Se mide en miliequivalentes de cationes por gramos (meq/g) de partículas de suelo.

Los diferentes tipos de arcillas tienen propiedades eléctricas distintas (Tabla 2.1), que son función del número y ubicación de las láminas de sílice (enlaces negativos) y de alúmina (enlaces positivos) que las constituyen (Seoáñez *et al.*, 1999).

Tabla 2.1. Capacidad de Intercambio Catiónico de las arcillas.

Arcilla	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)
Caolinita	3-15
Tipo Caolinita	10-15
Illitas	20-30
Vermiculitas	100-150
Montmorillonitas	80-120

Fuente: Seoáñez *et al.* (1999)

Los cationes intercambiables más usuales son: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} e H^+ .

De acuerdo con Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (2014), la CIC está relacionado con el pH del suelo, a mayores grados de acidez corresponde una mayor capacidad de intercambio catiónico, arenoso o pobre en materia orgánica. A distintos cationes ligados corresponden distintos espesores de película adsorbida, hecho que se ve

reflejado en las propiedades de plasticidad y resistencia al esfuerzo cortante, por lo que las propiedades mecánicas de una arcilla se pueden ver modificadas ante el cambio de los cationes contenidos.

Superficie específica

Se define como la sumatoria de la superficie expuesta de todas las partículas que entran en superficie específica de cualquier material conglomerado, a la superficie específica de cualquier material conglomerado de partículas de tamaños diversos. Por ende, se expresa en metros cuadrados / gramos (m^2/g) (Gelati *et al.*, 2009).

Ejemplificando la superficie específica, supongamos que tenemos una partícula prismática de lados “a” y espesor “z” como la que se muestra en la figura 2.1,

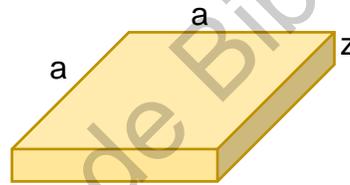


Figura 2.1. Partícula prismática de suelo.

entonces podemos calcular la superficie expuesta y el volumen de la partícula de la siguiente manera:

$$\text{Superficie} = 2a^2 + 4az \quad (2.1)$$

$$\text{Volumen} = a^2z \quad (2.2)$$

$$\text{Superficie Específica} = \frac{\text{Superficie}}{\text{Masa}} = \frac{2a^2 + 4az}{a^2z\gamma_s} = \frac{2a + 4z}{az\gamma_s} \quad (2.3)$$

$$\gamma_s = \text{Peso específico de los granos}$$

Las arcillas, al ser laminadas, se caracterizan por presentar una alta superficie específica. En la tabla 2.2 se presentan los valores típicos de superficie específica para minerales de arcilla.

Tabla 2.2. Valores típicos para minerales de arcilla

Mineral de arcilla	Superficie específica (m ² /g)
Caolinita	5-55
Illita	80-120
Montmorillonita	hasta 800

Fuente: Mitchell y Soga (2005).

Propiedades geotécnicas del suelo

Propiedades índice

El suelo posee ciertas propiedades cualitativas (Tabla 2.3) fáciles de medir tanto en campo como en laboratorio mediante las cuales se puede inferir un comportamiento más complejo del mismo, estas se denominan propiedades índice (Sowers, 1979).

Las propiedades índice son el primer acercamiento hacia los suelos y deben orientar la profundización del estudio a través de ensayos más elaborados; es decir, su uso debe ser limitado a la etapa preliminar y a un estimado de diseño (Sowers, 1979).

Tabla 2.3. Propiedades índice del suelo.

Propiedades del suelo

Peso específico

Contenido de humedad

Peso específico relativo de sólidos

Relaciones volumétricas y gravimétricas

Granulometría por tamizado

Granulometría por hidrómetro

Límite líquido

Límite plástico

Límite de contracción lineal

Límite de contracción volumétrica

Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia al esfuerzo cortante (Figura 2.2) en un suelo se define como la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y al deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior. Esta es dependiente de la cohesión interparticular del suelo, la resistencia a la fricción entre ellas y se ve influenciada por el contenido de agua presente en el suelo y la presión de agua intersticial (Das, 2015).

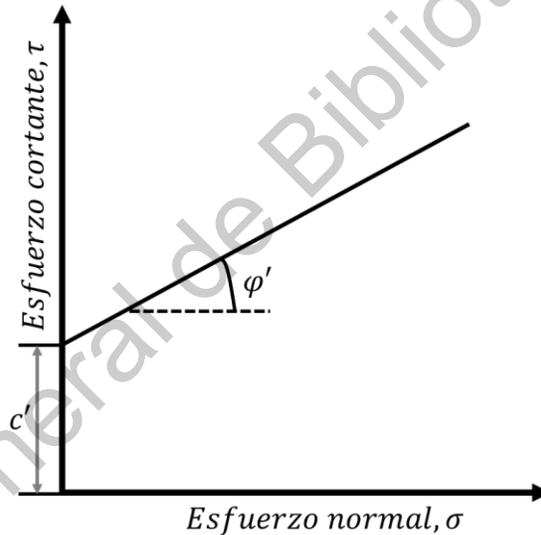


Figura 2.2. Resistencia al esfuerzo cortante mediante corte directo.

La cohesión se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas por un tirante compartido de agua, esto genera microestructuras que se van uniendo entre sí, dependientes de las fuerzas internas de estas en el suelo. El ángulo de fricción interna corresponde a la resistencia al deslizamiento causado por la fricción existente entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad.

Curva de retención de humedad

El fluido en el suelo está sujeto a campos de fuerzas que resultan de la atracción de la matriz sólida, la presencia de solutos, la acción de la presión externa, la atracción gravitacional y otros. El potencial gravitacional se mide desde la superficie de los suelos ($-z$) y el de presión es una función exclusiva del contenido de agua (Θ). Si el agua en el suelo se encuentra a una presión mayor a la atmosférica, el potencial de presión se considera positivo y por el contrario, si la presión es menor a la atmosférica el potencial es negativo. Cuando el potencial es negativo, se llama a potencial mátrico y, cuando se toma el valor absoluto de este se denomina succión mátrica (ψ). Este resulta de la combinación entre las fuerzas capilares y de adsorción presentadas como consecuencia de la estructura del suelo (SCT, 2002).

A la relación que existe entre el contenido de agua (Θ) o grado de saturación (S_r) del suelo con su respectiva succión mátrica (ψ) se le conoce como curva de retención suelo-agua (Meza, 2012).

Sin embargo, ante un suelo contaminado, se carece del conocimiento del comportamiento del suelo-agua-contaminante, por lo tanto, no existe una metodología que permita realizar el ensaye en un suelo con presencia de contaminante.

Combustible fósil

Los combustibles fósiles se formaron a partir de restos de animales y de plantas que fueron sometidos a condiciones de presión muy elevadas por la reducción total de los compuestos orgánicos hasta su estado mineral, o bien, por su reducción parcial a hidrocarburos (Jiménez, 2008).

El petróleo es un combustible fósil formado por la mezcla líquida de cientos de sustancias orgánicas, la mayor parte de ellas hidrocarburos (parafínicos, nafténicos y aromáticos). Contiene también pequeñas cantidades de compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno y algunos metales (Jiménez, 2008).

Se denomina petróleo crudo al que únicamente se le ha quitado el gas natural y el agua, es decir, a la mezcla de hidrocarburos líquidos que se extraen de los yacimientos y que permanecen en esta fase a la salida de las instalaciones superficiales de separación gas/aceite. Excluye, por tanto, la fracción de condensados y de líquidos obtenidos a partir del gas natural en plantas de extracción de licuables (Jiménez, 2008).

La producción nacional de petróleo crudo se realiza mayoritariamente en la región marina del Golfo de Campeche, la cual aportó el 71.8%, seguida de la región sur, con el 24.5% y por la región norte con el 3.7% (INECC, 2018).

Las etapas que componen el procesamiento del petróleo son: exploración, explotación, transporte, refinamiento, almacenamiento y uso. Las alteraciones ambientales que cada una provocan varían y son responsabilidad de diferentes sectores de la población y zonas donde se producen. Un resumen de los impactos producidos por cada etapa de procesamiento se encuentra en la Tabla 2.4. (Jiménez, 2008).

Tabla 2.4. Propiedades del diésel.

Propiedad	Rango
Viscosidad	1.9 a 4.1 cSt. a 40 °C
Densidad	0.832 g/cm ³
Índice de Cetano	45
Punto de ebullición	163 °C

Fuente: PEMEX (2000); REPSOL (2003),

Los destilados medios provienen del petróleo y se dividen en tres grandes grupos de acuerdo con su uso: combustible diésel (normal y especial), turbocombustible (turbosina usada para aviones de reacción) y combustible para calefacción o iluminación (Jiménez, 2008).

El diésel no es un combustible totalmente biodegradable; su biodegradabilidad depende de la estructura química de sus componentes orgánicos, de la

biodisponibilidad y de la presencia de oxígeno en el medio (Muskus *et al.*, 2013). Algunas de las propiedades del diésel son la viscosidad, la densidad, punto de ebullición, calidad de ignición; esta última se expresa en términos del número de cetano, que es muy similar al número de octano (Jiménez, 2008).

Suelo contaminado

La contaminación, desde un punto de vista ambiental, es la alteración de las características físicas, químicas o biológicas de los factores ambientales en grado tal que supongan un riesgo inaceptable para la salud humana y/o los ecosistemas (Sabroso y Pastor, 2004).

El suelo es un medio multifásico, al que afectan fenómenos físicos, químicos, biológicos y climáticos por una parte y por otra la acción del hombre a través de la contaminación de los cursos de agua y de las masas de agua, de los vertidos contaminantes, del depósito inapropiado de residuos de todo tipo, de la contaminación atmosférica, o simplemente, de la ocupación e impermeabilización mediante la construcción de habitaciones, industrias e infraestructura de transporte (Seoáñez *et al.*, 1999).

Tradicionalmente se consideró que se podía verter sobre el suelo todo lo que se desease, que tenía una capacidad de absorción y purificación prácticamente infinita. Las capacidades depuradoras de los suelos existen, pero actúan a tan largo plazo que es necesario considerar que a la escala de tiempo humano la regeneración de los suelos no se produce al ritmo suficiente como para impedir graves problemas de contaminación (Oyarzun *et al.*, 2011).

Una vez que el suelo alcanza su estado de equilibrio puede permanecer de forma dinámica en dicho estado mucho tiempo. Sin embargo, este equilibrio puede romperse fácilmente por acción fundamentalmente antrópica. Este tipo de modificación negativa del suelo es lo que se conoce como “degradación”. Entonces pues, la contaminación del suelo puede entenderse como un proceso de

degradación química y, por tanto, como un proceso que conlleva a la pérdida de productividad del suelo (Jiménez, 2017).

Remediación de suelos

La protección ambiental del suelo tiene una creciente importancia para la sociedad, tanto por seguridad y calidad ambiental como por sus repercusiones económicas. Las actividades potencialmente contaminantes, tienen que llevar un plan de control de sus emisiones al aire, suelo y aguas, así como adoptar las mejores técnicas disponibles para su tratamiento (SEMSIG, 2004).

I.1.1 Tecnología del tratamiento

El término “tecnología de tratamiento” implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (INECC, 2007). Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en el suelo de los desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente (INECC, 2007).

I.1.2 Microorganismos en la estructura del suelo

Los organismos presentes en el suelo pueden ser debido a restos de vegetales o animales que al morir se depositan en el suelo y sufren profundas transformaciones (Pereira *et al.*, 2011).

Los microorganismos descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono y los residuos más resistentes en humus y poseen metabolismos especiales que les permiten liberar nutrientes orgánicos, vivir en anaerobiosis, degradar moléculas, entre otras. Pueden descomponer restos orgánicos transformándolos en compuestos inorgánicos, cerrando el ciclo del carbono, el nitrógeno y el azufre (Atlas y Bartha, 2001).

De manera general se puede afirmar que los microorganismos se distribuyen según las condiciones ambientales y la disponibilidad de alimento. Por ejemplo, en los primeros centímetros del suelo existe mayor cantidad de restos orgánicos y O₂, por lo que allí se dispone la mayor cantidad de organismos con metabolismos aeróbicos. A mayor profundidad los microorganismos aeróbicos se localizan donde se conjugan condiciones óptimas de humedad y aireación. Exceso de humedad satura los poros y se crean condiciones de falta de O₂. En las capas más profundas del suelo superficial existe mayor cantidad de microorganismos tolerantes a la falta de O₂ y/o anaeróbicos que degradan compuestos derivados de la actividad de los microorganismos más superficiales (Ramos y Zuñiga, 2008).

El pH, es otro factor de importancia para la presencia y distribución de los microorganismos en el suelo. En ambientes ácidos predominan los hongos y contrariamente en ambientes alcalinos predominan los actinomicetes. Las bacterias en general están asociadas a suelos neutros (Ramos y Zuñiga, 2008).

Las bacterias del suelo pueden ser aerobias estrictas, anaerobias facultativas, microaerófilas o anaerobias estrictas. Determinados suelos pueden favorecer poblaciones bacterianas con un metabolismo particular. Entre los géneros más frecuentes de bacterias del suelo se encuentran *Acinobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Caulobacter*, *Cellulomonas*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* y *Xanthomonas* (Tortora *et al.*, 2007).

Los actinomicetes, bacterias Gram positivas aerobias que forman micelios ramificados, degradan los restos vegetales y animales, polímeros complejos e hidrocarburos y mantienen el suelo suelto y desmenuzado. La disponibilidad de nutrientes y de oxígeno determina el número y los tipos de actinomicetes de un suelo. Otro grupo de organismos aerobios, los hongos, degradan la materia orgánica del suelo (de los compuestos simples a los polímeros complejos). Algunos hongos son depredadores de protozoos o nematodos, limitando su población en el

suelo. Otros son micoparásitos, atacan a otras especies de hongos. Las algas se encuentran en pequeña cantidad, no contribuyen de manera significativa a la fertilidad del suelo, excepto en los arrozales, donde las cianobacterias fijan grandes cantidades de nitrógeno. Los protozoos, aunque poco importantes en cuanto a número e impacto en las transformaciones bioquímicas, desempeñan un papel importante como consumidores de bacterias, regulando el tamaño y la composición de su población (Tortora *et al.*, 2007).

Algunos microorganismos como bacterias, arqueas y microalgas sintetizan y acumulan polímeros de ácidos como material de reserva, a estos se le llama PHA o polímeros ácidos hidroxialcanoicos (Álvarez da Silva, 2016).

Como se ha señalado anteriormente, los microorganismos ejercen importantes acciones de alteración de los materiales edáficos. Los organismos transforman los constituyentes del suelo al extraer los nutrientes imprescindibles para su ciclo vital. El papel de los microorganismos en la transformación de la materia orgánica es tan importante que sin ellos la formación de suelos requeriría mucho más tiempo (Pereira *et al.*, 2011).

I.1.3 Clasificación de las tecnologías de remediación

El uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers, 1998).

De acuerdo con Sepúlveda y Trejo (2002) las tecnologías de biorremediación se pueden agrupar en 3 tipos:

- a) Biológicos (biorremediación, bioestimulación, fitorremediación, biolabranza, etc.), en donde las actividades metabólicas de ciertos organismos permiten la degradación, transformación o remoción de los contaminantes a productos metabólicos inocuos;

- b) Físicoquímicos (electrorremediación, lavado, solidificación/estabilización, etc.), aquí se toma ventaja de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes para destruir, separar o contener la contaminación; y
- c) Térmicos (incineración, vitrificación, desorción térmica, etc.), en los cuales se utiliza calor para promover la volatilización, quemar, descomponer o inmovilizar los contaminantes en un suelo (Martínez *et al.*, 2011).

En este trabajo se remedió el suelo contaminado mediante su biorremediación por atenuación natural y biopilas, los cuales se describen a continuación.

I.1.4 Biorremediación

La biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) para transformar a los contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes (Glazer y Nikaido, 1995).

Los microorganismos transforman y metabolizan aeróbicamente los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono, agua y fuentes de alimento para sustentar su crecimiento y reproducción, es decir, la biodegradación ocurre naturalmente (Van Deuren *et al.*, 1997).

Se sabe que los microorganismos autóctonos tienen la capacidad de adaptarse y eventualmente degradar cualquier compuesto orgánico natural sin asistencia del hombre. Sin embargo, esta adaptación requiere de la presencia de condiciones ambientales apropiadas tales como el pH, temperatura, el aceptor final de electrones (que en los procesos aerobios es el oxígeno), concentraciones de contaminante no tóxicas para los microorganismos y condiciones adecuadas de humedad y conductividad en el medio, entre las más importantes.

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades

catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren *et al.*, 1997).

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas presentes. El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales (Eweis *et al.*, 1998). La tabla 2.5 describe la capacidad de biodegradación de algunos compuestos habituales

La degradación se produce por el metabolismo de dichas poblaciones, que precisan para su crecimiento tanto carbono y nutrientes, provenientes normalmente de los contaminantes orgánicos y de adiciones (nutrientes), para la generación de material celular (anabolismo) y de la energía necesaria que sustente dichas reacciones (catabolismo) (SEMSIG, 2004).

Los procesos de respiración son los más habituales en la degradación de los compuestos orgánicos del suelo. Por otra parte la respiración aerobia desprende una mayor cantidad de energía que la anaerobia, por lo que los microorganismos aerobios crecen con mayor rapidez y degradan en menos tiempo los compuestos orgánicos (SEMSIG, 2004).

Los productos finales de la biodegradación, además del incremento de masa celular, es CO_2 y/o agua (respiración aerobia) o aceptores de electrones reducidos procedentes de la respiración anaerobia (N_2 , Mn^{+2} , S^{+2} , Fe^{+2} , CH_4) (SEMSIG, 2004).

Las técnicas de descontaminación basadas en la biorremediación emplean normalmente procesos de respiración aerobia, por su mayor rendimiento y facilidad de control de proceso (SEMSIG, 2004).

Los parámetros fundamentales del proceso aerobio son: aireación, humedad, temperatura, pH, nutrientes y tipo de microorganismos presentes (SEMSIG, 2004).

La humedad del suelo, con un rango óptimo de entre 50%-80%, es fundamental para el desarrollo microbiano, sirve para su crecimiento, desplazamiento, la disolución y asimilación de compuestos; sin embargo, una saturación excesiva evita la correcta aireación del suelo, dando lugar al desarrollo de zonas anaerobias, de menor rendimiento de biodegradación (SEMSIG, 2004).

La temperatura del suelo habitual en estos tratamientos se mantiene en el rango para las bacterias mesofílicas: 15°C - 45°C, las comunes en el suelo y que degradan adecuadamente los compuestos orgánicos más habituales. No obstante para la degradación de ciertos compuestos puede ser más adecuado el empleo del rango de las bacterias termofílicas 45°C - 65°C (SEMSIG, 2004).

Tabla 2.5. Capacidad de biodegradación de algunos compuestos habituales.

	Compuestos	Productos donde se encuentran	
Más degradable	n-butano, l-pentano	Gasolina	
	n-octano		
	Nonano	Diésel fuel	
	Metil butano	Gasolina	
	Dimetilpentano		
	Metiloctanos		
	Benceno, tolueno	Gasolina	
	Etilbenzeno, xilenos		
	Propielbenzenos	Diésel, Queroseno	
	Decanos	Diésel	
	Dodecanos	Queroseno	
	Tridecanos	Fuel de calefacción	
	Tetradecanos	Aceites lubricantes	
	Menos degradable	Naftalenos	Diésel
	Fluorantenos	Queroseno	
	Pirenos	Fuel de calefacción Aceites de lubricación	

Fuente: SEMSIG (2004).

Dentro de cada rango el incremento de 10°C en la temperatura duplica aproximadamente la tasa de degradación, debido a una mayor actividad energética,

a la mayor solubilidad de los contaminantes y a su menor adsorción al suelo (SEMSIG, 2004).

Para que los procesos de remediación sean efectivos, el pH del suelo debe estar en el rango de 6 a 8 (SEMSIG, 2004).

El contenido de nutrientes en el suelo presenta una relación carbono-nitrógeno-fósforo (C:N:P) de 100:10:1 o 100:1:0.5, dependiendo de los microorganismos presentes y el compuesto a degradar (SEMSIG, 2004).

La remediación de los suelos contaminados se puede realizar mediante el uso de uno o más métodos en función de la complejidad del contaminante y su interacción con la matriz ambiental. En este sentido, la biorremediación es una de las alternativas frecuentemente empleadas en la remediación de los suelos contaminados con compuestos orgánicos.

Algunas de las ventajas que tiene la biorremediación sobre otras tecnologías existentes radican en que se puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), se puede realizarse *in-situ* o *ex-situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis, 1999).

La biorremediación es una de las tecnologías más seguras, limpias, económicas y ecológicas para descontaminar aquellos sitios que se contaminaron con una amplia gama de compuestos orgánicos. Utiliza numerosos agentes como bacterias, levaduras, hongos, algas y plantas superiores como herramientas principales en el tratamiento de derrames de petróleo y metales pesados existentes en el medio ambiente (Gupta *et al.*, 2016).

Existen algunas dificultades en la aplicación debido a las restricciones impuestas por el sustrato y variabilidad ambiental, el potencial limitado de biodegradación y la viabilidad de los microorganismos de origen natural, entre otras (Garzón *et al.*, 2017).

Teniendo en cuenta el potencial de biodegradación del diésel, la aplicación de técnicas de biorremediación representa una alternativa eficiente, económica, versátil y ambientalmente amigable (Margesin *et al.*, 2001).

1.1.4.1 Biopilas

Las biopilas, también conocidas como bioceldas, biocúmulos, biomontículos o pilas de composta, es un método de biorremediación, que se refiere al apilamiento de suelos contaminados que requieren la adición de nutrientes, minerales, aireación y cierto nivel de humedad, para así estimular la actividad microbiana aerobia presente en los suelos (Figura 2.3).

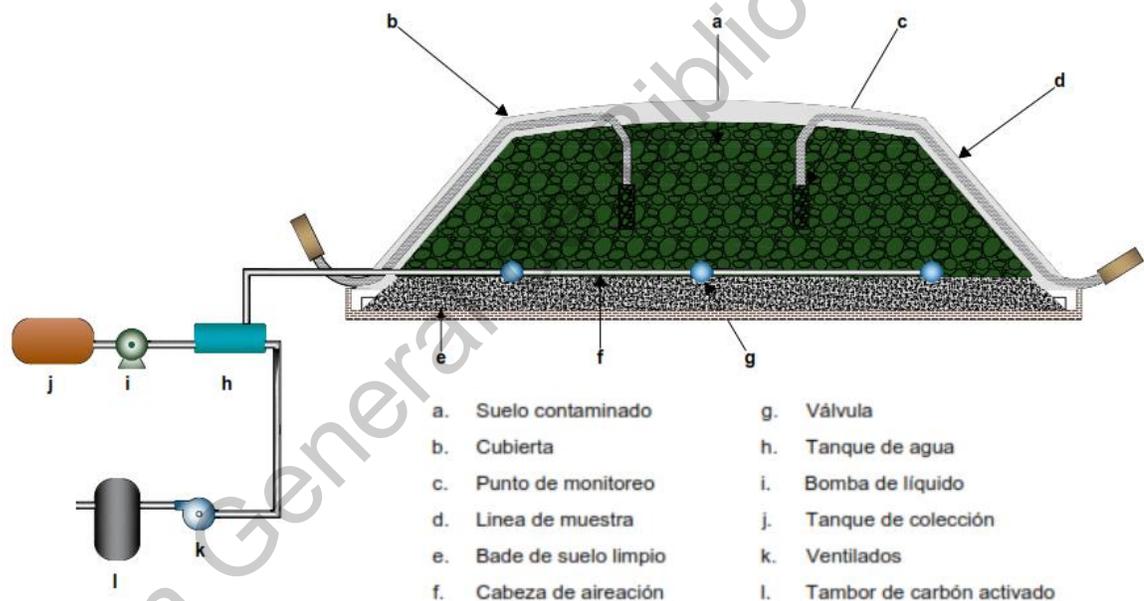


Figura 2.3. Diseño de una biopila temporal.

Una vez formadas o construidas las pilas, éstas deben cubrirse con una cubierta de plástico para evitar tanto la volatilización de los HTP como la pérdida de calor en el proceso. Si la concentración de compuestos volátiles es significativa, deberá colocarse un filtro a la salida del aireador, para tratar los gases antes de ser liberados a la atmósfera (Roldán e Iturbe, 2002).

Las biopilas constituyen una tecnología de biorremediación de suelos contaminados que se ha empleado a nivel mundial. En México se usó esta tecnología para la limpieza de 45,000 ton de sedimentos contaminados con hidrocarburos. En varios sitios contaminados por la industria petrolera mexicana se aplica el concepto de la biorremediación con resultados regulares debido a problemas en la estimulación de las bacterias y la falta de monitoreo de los sitios (Schmidt, 2001).

Las biopilas constituyen uno de los métodos de biodegradación ex-situ más eficaces para la descontaminación de los suelos afectados por hidrocarburos. El fundamento del biotratamiento es relativamente sencillo. Consiste en potenciar la biodegradación de los hidrocarburos como consecuencia de la presencia de microorganismos autóctonos (bacterias, hongos, levaduras, etc.) degradadores de diversos contaminantes.

Por lo tanto, para que el sistema tenga éxito hay que asegurar que los suelos de forma natural presenten un volumen adecuado de población bacteriana y que las condiciones ambientales dentro de la biopila sean las apropiadas (humedad, temperatura, pH, contenido en nutrientes, toxicidad, etc.) (Geotecnia 2000, 2000).

1.1.4.1.1 Principios de operación

Las biopilas se diseñan para optimizar aquellas condiciones que favorecen el crecimiento y actividad de los microorganismos o bacterias aerobias responsables de la degradación de los contaminantes orgánicos. Así, la efectividad de un sistema de biopilas dependerá de diversos factores, los cuales pueden agruparse en tres categorías de acuerdo con Alarcón y Ferrera-Cerrato, (2013):

i. Características del suelo

Entre las características del suelo por considerar se encuentran la textura y la permeabilidad del suelo, tipo y concentración de biota nativa, pH, nutrientes, humedad, temperatura y presencia de compuestos tóxicos.

Textura y permeabilidad. La textura del suelo afecta su permeabilidad, el contenido de humedad y la densidad de volumen (o densidad aparente) del suelo. Los suelos con mayor contenido de arena presentan una baja capacidad de retención de agua y alta permeabilidad, estos suelos generalmente presentan buena aireación y drenan en forma adecuada. Los suelos con altos contenidos de limos y arcillas tienden a ser cohesivos presentando una alta capacidad de retención de agua y baja permeabilidad, lo cual da lugar a bajas velocidades de filtración y aireación.

Tipo y concentración de biota nativa. Los suelos contienen cantidades importantes de microorganismos que incluyen una diversidad de grupos como son bacterias, algas, hongos, protozoarios y actinomicetos. Los suelos con mejor permeabilidad poseen organismos aerobios, dentro de los cuales sobresalen las bacterias por su alta actividad dentro del suelo y la poca necesidad de oxígeno.

pH del suelo. Para favorecer el crecimiento bacteriano, el pH del suelo deberá encontrarse entre 6 y 8 con un valor de 7 como óptimo. Un desplazamiento en el pH puede resultar en un desplazamiento de la población microbiana debido a que cada especie exhibe un pH óptimo de crecimiento (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Nutrientes. Los microorganismos requieren una fuente de carbono para construir la biomasa, así los contaminantes y otros compuestos orgánicos presentes en el suelo proveen, normalmente, una cantidad adecuada de carbono, pero la disponibilidad de otros nutrientes esenciales tales como nitrógeno, fósforo, o potasio pueden resultar insuficiente en relación con la cantidad de carbono presente. Si se requiere un suministro adicional de carbono para mantener un crecimiento microbiano óptimo se puede adicionar glucosa, acetato o citrato (U.S. EPA, 1990).

Humedad. El agua no solamente provee el medio de transporte de los compuestos químicos que proporcionan energía y nutrientes a los microorganismos del suelo sino también hace posible que los procesos metabólicos tengan lugar. Sin embargo, un suelo excesivamente húmedo restringe el movimiento de aire a través

de la superficie, reduciendo la disponibilidad de oxígeno, el cual es esencial para los procesos metabólicos bacterianos. El rango ideal de humedad de suelo se encuentra entre 25% y 90% de su capacidad de retención de agua (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Temperatura. La temperatura del suelo tiene efecto tanto en la actividad microbiana como en las velocidades de degradación de los compuestos orgánicos. Las bacterias generalmente crecen bien en rangos estrechos de temperatura. La actividad microbiana para la mayoría de las bacterias involucradas en procesos de biodegradación de HTP disminuye cuando la temperatura es mayor a 45°C o cuando esta es menor a 10°C (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Presencia de compuestos tóxicos. La presencia de altas concentraciones de HTP en los suelos (>50,000 mg kg⁻¹) o metales pesados (>2,500 mg kg⁻¹) pueden resultar tóxicos o inhibir el crecimiento y reproducción de las bacterias responsables de la biodegradación de los compuestos orgánicos. De igual forma, bajas concentraciones de materiales orgánicos resultarán en una baja actividad microbiana (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

ii. Características de los contaminantes

El éxito de una remediación con biopilas depende fuertemente de las características de los contaminantes. Los HTP, como gasolina, diésel, lubricantes y petróleo crudo, contienen una diversidad de compuestos orgánicos. Para ser susceptibles de tratamiento por biopilas, los compuestos deben biodegradarse bajo condiciones aerobias a una velocidad lo suficientemente rápida para permitir que la biorremediación tenga lugar en unos cuantos meses y que permita que la biodegradación predomine sobre la volatilización (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Volatilidad. La volatilidad de los contaminantes en cualquier proceso de biorremediación, es importante debido a que los compuestos volátiles tienden a evaporarse más que a ser biodegradados por las bacterias durante las operaciones de extracción o inyección (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Estructura química. La estructura química de los contaminantes presentes en los suelos propuestos para el tratamiento de biopilas determina la velocidad a la cual ocurrirá su biodegradación. El peso molecular de los HTP puede utilizarse como una medida general de la susceptibilidad para ser degradado, los hidrocarburos con menos de 20 átomos de carbono presentan una rápida degradación, mientras que aquellos que tienen 40 o más átomos de carbono presentan una menor degradación (Lundgren *et al.*, 1997).

1.1.4.1.2 Diseño del sistema

El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad. El incremento de la actividad microbiana es proporcional a la reducción de las concentraciones de HTP.

1.1.4.1.3 Ventajas y limitantes de la tecnología de biopilas

El uso de las biopilas tiene diversas ventajas, entre las que destacan:

- Los contaminantes se degradan en vez de pasar a otra condición.
- El diseño y construcción son relativamente fáciles.
- El saneamiento del suelo se lleva a cabo en un período entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo.
- El suelo saneado mediante biopilas no requiere ser confinado después.
- Las biopilas ofrecen un costo más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

Mientras que las principales limitaciones que tiene este método son:

- Los HAP de cinco y seis anillos son difícilmente degradables en las biopilas.
- Las biopilas no son efectivas para concentraciones de HTP superiores a 50, 000 mg/kg.

- La presencia de metales pesados puede inhibir el crecimiento de microorganismos

1.1.4.2 Atenuación natural

Existen diferentes definiciones de atenuación natural (AN) o atenuación natural supervisada o monitoreada (Monitoring Natural Attenuation; MNA) puesto que hasta el momento no existe una definición establecida por alguna institución gubernamental u oficial en México. Asimismo, en los últimos años han surgido nuevas variantes del proceso básico de la AN, como la atenuación natural asistida y la atenuación natural mejorada o aumentada (Enhanced Natural Attenuation), las cuales en el sentido estricto del proceso, son tecnologías activas de biorremediación (con intervención humana) (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

La Agencia de Protección del Ambiente (EPA) de Estados Unidos, maneja el término de atenuación natural supervisada o monitoreada (MNA), haciendo énfasis en el seguimiento, supervisión o monitoreo del proceso, y la define como la técnica que depende de los procesos naturales de la atenuación para alcanzar objetivos de remediación de sitios específicos, dentro de un tiempo que sea razonable, comparado con otros métodos activos (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

La atenuación natural aprovecha los procesos naturales para contener la contaminación causada por derrames de productos químicos y reducir la concentración y la cantidad de contaminantes en los lugares afectados. La atenuación natural, conocida también como medidas correctivas intrínsecas, bioatenuación o biocorrección intrínseca, es un método de tratamiento *in-situ*, o sea, que se dejan los contaminantes donde están mientras se produce la remoción natural del contaminante.

La AN incluye una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, que bajo condiciones favorables y sin la intervención humana, reducen la masa, toxicidad, volumen o concentración de los contaminantes en suelo o aguas subterránea. Esos procesos *in-situ* incluyen la biodegradación, la dispersión, la dilución, la absorción,

la volatilización, el decaimiento radiactivo, la estabilización, la transformación, y la destrucción química o biológica de los contaminantes (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

La European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste la refiere como “la combinación de todos los procesos naturales de degradación que se llevan a cabo en el suelo y aguas subterráneas, como biodegradación, adsorción, dilución y reacciones químicas con el mismo suelo”. Con el tiempo estos procesos naturales reducen la concentración de contaminantes a niveles aceptables, niveles que no representan un riesgo para la salud humana y para los ecosistemas (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

La AN debe reducir el riesgo potencial en tres formas: 1. Al transformar el contaminante a un compuesto menos tóxico a través de procesos degradativos como la biodegradación o transformación abiótica; 2. Al reducir la concentración de del contaminante, con lo cual los potenciales de exposición pueden ser abatidos, y 3. Al disminuir la movilidad y biodisponibilidad del contaminante a través de la adsorción en el suelo y la matriz rocosa.

Con frecuencia se utiliza la atenuación natural como parte de la limpieza de un sitio donde también se recurre al control o la extracción de la fuente de contaminación (Oficina de Innovaciones Tecnológicas, 1996). Los procesos de atenuación natural pueden reducir la masa del contaminante (por medio de procesos destructivos tales como biodegradación y transformaciones químicas), reducir su concentración (mediante dilución o dispersión) o unir los contaminantes a partículas de suelo a fin de que la contaminación no se propague o no se extienda demasiado (adsorción) (Oficina de Innovaciones Tecnológicas, 1996).

La principal ventaja que se tiene con este método consiste en el bajo nivel de intervención, reduciendo así costos e impactos sobre el terreno, y al no existir movimiento de tierras ni bombeo de aguas no se interrumpe la actividad en superficie. Sin embargo, es un método de recuperación a largo plazo y, en algunos

casos, los procesos de atenuación pueden ser temporales (Oficina de Innovaciones Tecnológicas, 1996).

1.1.4.2.1 Procesos de la atenuación natural

Los procesos que intervienen en la atenuación natural son de tipo físico, químico y biológico, que en condiciones favorables actúan sin la intervención humana, reduciendo la toxicidad, movilidad, volumen o concentración del contaminante en el suelo o el agua subterránea (Figura 2.4) (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

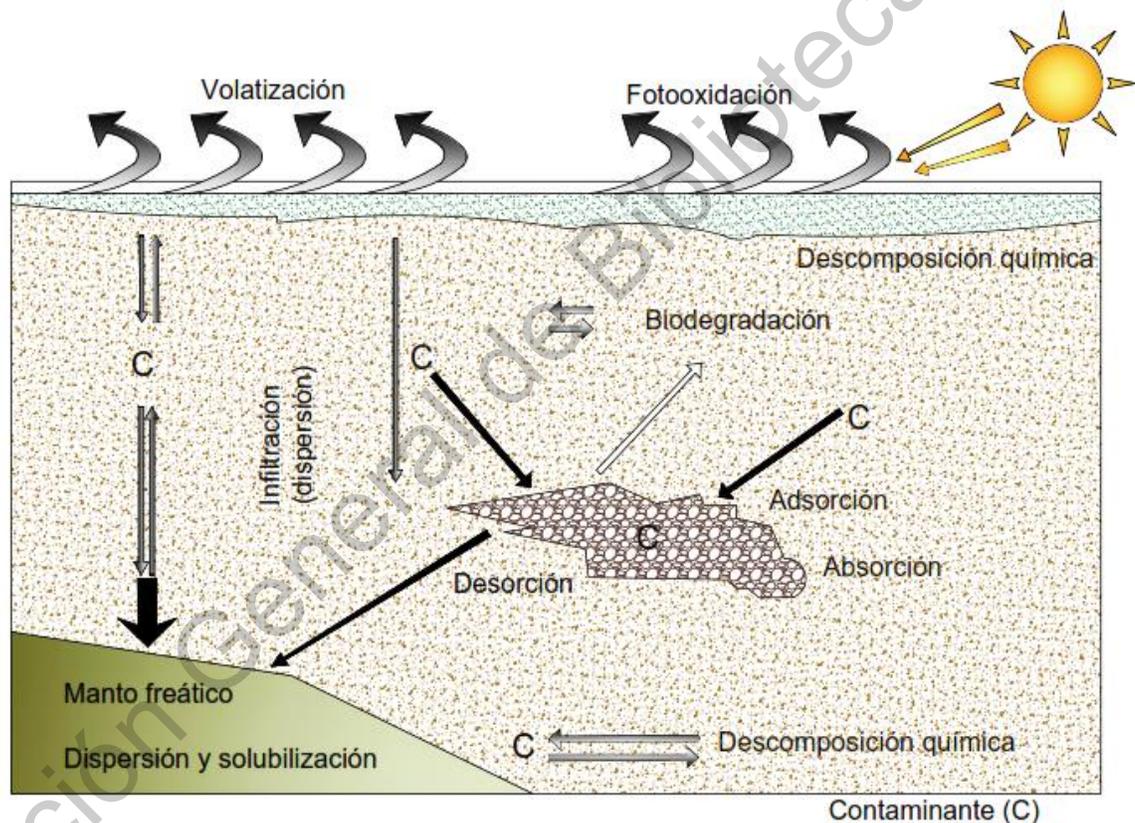


Figura 2.4. Procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la atenuación natural de los contaminantes.

i. Biodegradación

Se define como el proceso de descomposición de una sustancia mediante la acción de organismos vivos, principalmente por microorganismos que transforman las moléculas orgánicas en ácidos grasos, dióxido de carbono, agua y

biomasa. El papel relevante que tiene la biodegradación en la eliminación de contaminantes, se debe a que un gran número de compuesto orgánicos como hidrocarburos del petróleo, pueden ser transformados o degradados por diversos microorganismos como *Klebsiella* sp., *Chromobacterium* sp., *Flavimonas orizihabitans*, *Enterobacter cloacae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus brevis*, *B. pumillus* y *B. cereus*, aisladas frecuentemente de suelos contaminados con compuestos petrogénicos (Narváez-Flores *et al.*, 2008). La biodegradación de los contaminantes depende de diferentes factores: la microflora presente, concentración de nutrientes (N y P), concentración de oxígeno o aceptores de electrones, temperatura, salinidad, así como la estructura química del hidrocarburo (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

La biodegradación se puede llevar a cabo tanto en condiciones aerobias como anaerobias; sin embargo, los procesos aerobios son más eficientes y la biodegradación de los contaminantes se efectúa de forma más rápida (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

ii. Biotransformación

Algunos compuestos inorgánicos, como los metales y no metales (As, Cr, Hg), si bien no pueden ser biodegradados, si pueden ser biotransformados, los microorganismos pueden cambiar su estado de oxidación y, precipitarlos, así como mediar su metilación o desmetilación, haciéndolos menos tóxicos y/o menos disponibles, disminuyendo el riesgo a la salud humana y al ambiente (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

iii. Sorción

Los contaminantes en función de sus propiedades físicas y químicas (polaridad, carga, tamaño, forma química y estado de oxidación), pueden ser absorbidos o desorbidos en las partículas del suelo, reduciendo su movimiento o transporte (retardo) o reteniéndolos (inmovilización). La sorción puede influenciar la volatilización y la biodegradación, al hacerlos menos disponibles. En el caso de los

hidrocarburos por su estructura apolar, son adsorbidos comúnmente por enlaces hidrofóbicos (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

iv. Transformación química

Los tipos de reacción más importantes que se llevan a cabo en el suelo son de óxido-reducción, ácido-base, e hidrólisis (Eweis *et al.*, 1999). Sin embargo la mayor parte de los hidrocarburos no son significativamente degradados por reacciones químicas (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

v. Volatilización

Varios compuestos orgánicos, principalmente de bajo peso molecular, pueden evaporarse hacia la atmósfera, donde son dispersados por las corrientes de aire, reduciendo su concentración en el sitio. El compuesto en la atmósfera puede ser fotooxidado, contribuyendo a su degradación, o sólo cambiar de sitio y diluirse. Los vapores que están en contacto con el suelo pueden ser biodegradados más fácilmente por la microflora presente. La vaporización se lleva a cabo principalmente en contaminaciones recientes (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

vi. Fotooxidación

La fotooxidación, reacción inducida por la luz (IUPAC, 1997), es una importante vía de transformación de hidrocarburos, principalmente en los ambientes marinos (Laane *et al.*, 1985). Los hidrocarburos aromáticos son más sensibles que los hidrocarburos saturados o alcanos a la degradación fotoquímica (Taghvaei *et al.*, 2007).

Una parte fundamental de la atenuación natural es la interacción contaminante-suelo-agua, donde se lleva a cabo la transferencia de masa por la adsorción física y química; fenómeno que depende de la naturaleza, carga y propiedades reactivas de las partículas del suelo y del contaminante (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

Las superficies reactivas de la fracción del suelo o el suelo sólido proveen el sitio de reacción entre éste y los contaminantes que se encuentran en el agua de los

poros del suelo. La naturaleza de la fuerza del enlace, entre el contaminante y el suelo, depende de los grupos funcionales de la superficie de ambos. Aunado a las características del contaminante y del suelo, también influye la capacidad de retención de agua del suelo la humedad y las interacciones energéticas del agua con el suelo (polaridad, capilaridad y ósmosis). Las propiedades físicas y químicas de los suelos influyen de manera importante en la aireación, la disponibilidad de los nutrientes, de las sales y los metales, así como en la retención de agua, por tanto tiene un efecto considerable en la actividad biológica (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

vii. Movilidad y partición de solutos

El movimiento de los contaminantes en el suelo se lleva a cabo a través de mecanismos de advección, de dispersión y de transferencia entre fases. En función de su naturaleza, los contaminantes pueden ser transportados a diferentes velocidades y ser transformados químicamente al ir avanzando a través del suelo.

La heterogeneidad del suelo (composición en arcillas, limo y arena) también tiene un efecto en el movimiento del agua y los contaminantes (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013). Los compuestos químicos y los iones se mueven con el fluido debido a la advección (movimiento de partículas o de un contaminante debido a la velocidad del flujo), por el proceso de dispersión hidrodinámica, que se lleva a cabo cuando hay un gradiente de concentración generándose un movimiento de contaminantes por dispersión mecánica y difusión molecular. La partición de los contaminantes es cuando la molécula deja de moverse por advección o dispersión y es retenida o eliminada por los procesos de adsorción, mezcla, absorción y volatilización previamente descritos; la mezcla se refiere a la cantidad de contaminante puro que se mezclará en el agua, puede ser homogénea o heterogénea; y que está limitada por la solubilidad del compuesto.

1.1.4.2.2 Ventajas y limitaciones de la atenuación natural

La AN presenta las siguientes ventajas y limitaciones (EPA, 1999):

- Los contaminantes son transformados *in situ*, a compuestos menos tóxicos, a CO₂ y H₂O.
- Permite recuperar las propiedades física y químicas del suelo en estado natural, en un alto porcentaje, a diferencia de otras tecnologías que alteran la estructura original del suelo.
- Los contaminantes no son transferidos a otra fase.
- Aplicación flexible a la totalidad o parte del sitio.
- Aplicable después de una remediación activa.
- No requiere de equipo para el tratamiento o la disposición de residuos,
- Los contaminantes y/o el suelo no son transportados a otros sitios, lo que podría significar riesgo para el receptor potencial.
- Es más económica, solo se requieren costos para el monitoreo.
- Se puede integrar como parte de un saneamiento general para sitios altamente contaminados.
- Es un proceso que puede llegar a ser lento
- Requiere una caracterización completa del sitio, por tanto los costos de monitoreo son superiores a aquellos de un monitoreo durante un saneamiento activo.
- La efectividad de la atenuación natural puede ser afectada por variaciones de los factores ambientales (climatológicas) o por cambios inducidos (actividades de ingeniería).

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Capítulo III

METODOLOGÍA

Localización y ubicación del suelo en estudio

El estado de Querétaro se encuentra situado en las coordenadas geográficas, norte $41^{\circ} 20' 12''$; al sur $20^{\circ} 00' 54''$; al este $99^{\circ} 02' 35''$; y al oeste $100^{\circ} 35' 48''$ a los extremos del estado, ubicándose en la zona centro de México. Limita al Norte con Guanajuato y San Luis Potosí; al este con San Luis Potosí e Hidalgo; al sur con Hidalgo, el Estado de México y Michoacán de Ocampo; y al oeste con Guanajuato. Debido a sus dimensiones, Querétaro posee una superficie territorial aproximada de $11,699 \text{ km}^2$ (INEGI, 2017).

Muestreo

Para la realización del proyecto, se realizó la extracción de muestras alteradas de un suelo limoso de alta compresibilidad (MH) con presencia de arcilla, así como la extracción de pequeñas muestras inalteradas para determinar el peso específico y contenido de humedad del suelo. El sitio no se encuentra contaminado por ningún líquido o sustancia, es decir, el suelo se extrajo en condiciones naturales.

El suelo en estudio fue extraído de una zona agrícola perteneciente al municipio de Santa Rosa Jáuregui, en el estado de Querétaro, ubicado en las coordenadas $20^{\circ} 44' 09'' \text{ N}$ y $100^{\circ} 26' 10'' \text{ W}$. En la zona predominan los suelos vertisoles, constituidos principalmente por arcillas y limos (INEGI, 2014).



Figura 3.1. Localización geográfica del sitio de muestreo del suelo en estudio.

Fuente: Google maps, Google Earth, (2019).

Caracterización del suelo

Para la caracterización de las propiedades del suelo se emplearon diversos procedimientos descritos en las normativas de la *American Society of Testing Materials (ASTM)*. Para las propiedades químicas se emplearon ASTM D2974-13 para la determinación de materia orgánica y ASTM D4972-13 para la determinación de pH en el suelo. La normativa ASTM C837-09-14 se empleó para la determinación de la superficie específica. Y respecto a la caracterización de las propiedades geotécnicas del suelo se emplearon: ASTM D427-10 para peso específico (γ_m) y límite de contracción, ASTM D2216-10 para contenido de humedad (ω), ASTM D854-14 para peso específico relativo (S_s), en cuanto al análisis granulométrico del suelo por vía seca y vía húmeda se utilizaron la ASTM D6913-1913M-17 y ASTM D422-63-07, respectivamente. La determinación de los límites de consistencia (Atterberg) se realizó mediante BS 1377-2:1990 para límite líquido y ASTM D4318-17 para límite plástico y contracción lineal. Se procedió a la clasificación del suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) descrito en ASTM D2487-14. Adicionalmente la resistencia a esfuerzo cortante y la permeabilidad se determinaron mediante los estándares ASTM D3080/3080M-11 y ASTM D5084-16, respectivamente. En la figura 3.2 se muestra un diagrama sobre la metodología general empleada en el proyecto de investigación.



Figura 3.2. Metodología general realizada en el proyecto de investigación.

Contaminación del suelo

Para la contaminación del suelo, se tomaron 80 kg de suelo no contaminado. Se procedió a secar al sol, y seguidamente, se le agregó diésel hasta que el suelo retuviera la mayor cantidad de contaminante (20 litros). Se dejó reposar en un recipiente con drenaje, y se permitió su estabilización durante 4 semanas. Se consideró que el suelo estaba estable al cumplir el tiempo mencionado y cuando el material dejó de permear contaminante.



Figura 3.3. Proceso de contaminación del suelo.

Biopilas

Se colocó el suelo estabilizado en un contenedor de plástico que permitió el drenado de contaminante presente en el material. Para controlar el proceso aerobio del suelo se colocaron 5 difusores de aire de 30 cm de longitud, de forma perpendicular al borde más largo del recipiente, a cada lado del recipiente. Se inyectó aire de forma homogénea en cada uno de los difusores durante todo el proceso, en lapsos de 8-10 horas al inicio de la prueba y en tiempo prolongado al finalizar la prueba, esto para acelerar el proceso. Se agregó un kilogramo de urea Prill 46-00-00, marca YARA, en forma granular cumplir con la relación C:N:P 100:10:1 requerida por esta metodología de remediación.



Figura 3.4. Proceso de remediación mediante biopilas.

Durante el proceso de estabilización se monitorearon la temperatura, el pH y el contenido de líquidos porcentual de material respecto al contenido de sólidos, secando en horno a una temperatura de $165\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, como consecuencia de la temperatura de ebullición del diésel.

Atenuación natural

Se colocó el suelo estabilizado en un contenedor de plástico que permitió el drenado del contaminante del material. Para reproducir las condiciones gravimétricas del suelo no contaminado, se compactó el material en 3 capas considerando un peso específico de 1.54 t/m^3 . Se permitió el proceso aerobio del suelo manteniendo destapado el contenedor. Durante el proceso de estabilización se monitorearon la temperatura, el pH, el contenido de materia orgánica y por ende el contenido de diésel bajo una propuesta de calibración, y el contenido de líquidos porcentual de material respecto al contenido de sólidos, secando en horno a una temperatura de $165\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, como consecuencia de la temperatura de ebullición del diésel.

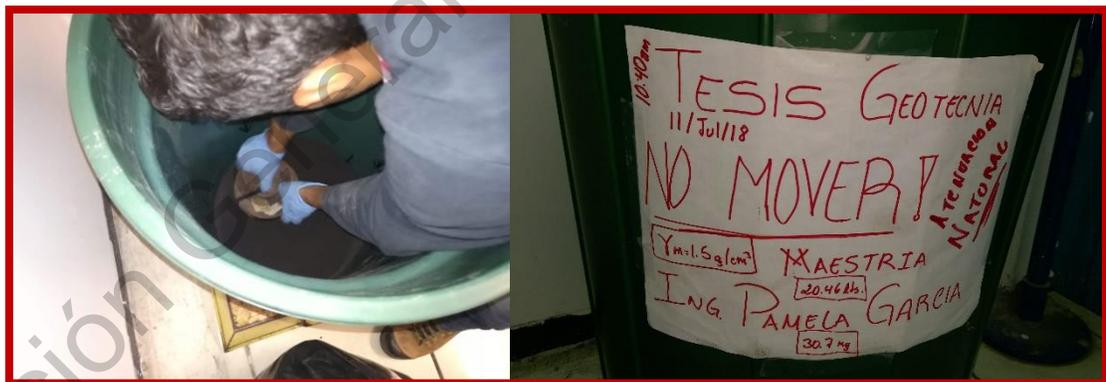


Figura 3.5. Proceso de remoldeo para remediación mediante atenuación natural.

Caracterización química

Contenido de materia orgánica (MO) (ASTM D2974, 2013)

Suelo natural

Esta prueba consistió en tomar $50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de la muestra de suelo inalterada para el suelo natural, y de suelo en etapa final para el suelo contaminando, en atenuación natural y bioestimulación; y se colocó en un recipiente para obtener el peso de la muestra húmeda (W_{mw}). Se dejó secar en el horno durante al menos 24 horas, a una temperatura de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y se obtuvo el peso de la muestra seca (W_{ms}), esto para determinar el contenido de humedad de dichas muestras. Seguidamente se procedió a colocar las muestras en una mufla a temperatura constante de $550 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 1 hora. Se obtuvo el peso de las cenizas (W_{mc}), y se reportó el contenido de materia orgánica de acuerdo con las condiciones iniciales de la muestra. El cálculo del contenido de materia orgánica se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$MO = \left(1 - \frac{W_{mc}}{W_{mw}}\right) \times 100 \quad (3.1)$$



Figura 3.6. Determinación del contenido de materia orgánica.

Para dicho procedimiento se realizaron tres repeticiones en cada etapa y se obtuvo un promedio de los datos obtenidos.

Suelo contaminado

Esta prueba consistió en tomar $50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de la muestra de suelo inalterada para el suelo natural, y de suelo en etapa final para el suelo contaminando, en atenuación natural y bioestimulación; y se colocó en un recipiente para obtener el peso de la muestra húmeda (W_{mw}). Se dejó secar en el horno durante al menos 24 horas, a una temperatura de $165 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ y se obtuvo el peso de la muestra seca (W_{ms}), esto para determinar el contenido de humedad de dichas muestras. Seguidamente se procedió a colocar las muestras en una mufla a temperatura constante de 550 °C , durante 1 hora. Se obtuvo el peso de las cenizas (W_{mc}), y se reportó el contenido de materia orgánica de acuerdo a las condiciones iniciales de la muestra. El cálculo del contenido de materia orgánica se obtuvo mediante la ecuación (3.1).

Para dicho procedimiento se realizaron tres repeticiones en cada etapa y se obtuvo un promedio de los datos obtenidos.



Figura 3.7. Determinación del contenido de materia orgánica en suelo con contaminante.

pH (ASTM D4972, 2013)

Suelo natural

Para la determinación del pH del suelo, se tomaron 20 g de material secado en el horno a $110 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, y se elaboró una solución con 40 ml de agua destilada en

proporción 1:2. La solución se mezcló durante 2 etapas de 30 minutos. Primero, se mezcló el material durante 3 repeticiones de 5 minutos, alternando con 5 minutos de reposo. En la segunda etapa, se mezcló el material por 15 minutos y se deja reposar durante 15 minutos. Terminado el proceso de mezclado y reposo, se introdujo el electrodo del pH-metro en la solución, y el equipo mostró el valor del pH y la temperatura de la solución.



Figura 3.8. Determinación del pH del suelo.

Suelo contaminado

Durante las etapas de suelo natural, suelo contaminado, e inicio y final del estado de remediación, se realizaron tres repeticiones del ensaye y se obtuvo el promedio de estos.

Para la determinación del pH del suelo, en sus distintas etapas, fue necesario tomar 20gr de material, previamente secado en horno a una temperatura de $165\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se utilizó para elaborar una solución con agua destilada en proporción 1:2. La solución se mezcló durante 2 etapas de 30 minutos. En la primera etapa, se mezcló el material por 5 minutos y se dejó reposar durante 5 minutos, se repitió el proceso hasta cumplir con el tiempo establecido. Durante la segunda etapa, se mezcló el material por 15 minutos y se deja reposar durante 15 minutos. Terminado el proceso de mezclado, se introdujo el electrodo del pH-metro en la solución, y el equipo mostró el valor del pH de la solución.

Superficie específica (ASTM C837-09, 2014)

Suelo natural

Se tomaron 3 g de muestra disueltos en 9ml de agua haciendo uso del agitador magnético. Previamente se elaboró una mezcla de 1 gramo de azul de metileno en 200ml de agua, solución que, con ayuda de una bureta, se fue incorporando en cantidades de 0.5ml por 1 min de agitación al suelo disuelto. Se tomó una cantidad de la mezcla con la punta de una varilla de vidrio y se colocó en un papel filtro Whatman #42 hasta obtener un halo de azul más claro alrededor de la mancha de la solución de azul y suelo.

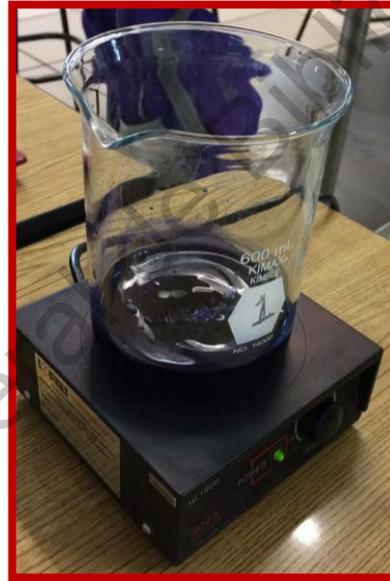


Figura 3.9. Determinación de la superficie específica del suelo.

El ensaye se realizó tres veces durante las caracterizaciones de los diferentes estados del suelo, y se calculó un promedio.

Suelo contaminado

Se tomaron 3 g de suelo, previamente secado al horno a $165\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se disolvieron en 9ml de agua haciendo uso del agitador magnético. Previamente se elaboró una mezcla de 1 gramo azul de metileno en 200ml de agua, solución que,

con ayuda de una bureta, se fue incorporando en cantidades de 0.5ml por 1 min de agitación al suelo disuelto. En cada agitación, se tomó una cantidad de la mezcla con la punta de una varilla de vidrio y se colocó en un papel whatman #42 hasta obtener un halo de azul más claro alrededor de la mancha de la solución de azul y suelo.



Figura 3.10. Determinación de la superficie específica en suelo con contaminante.

Caracterización geotécnica

Para la caracterización del suelo con presencia de contaminante se realizaron ciertas modificaciones a las pruebas requeridas, descritas en las normativas ASTM, ajustando los procedimientos, cuidados y temperaturas requeridas a las condiciones necesarias debido a la presencia y las propiedades del diésel presente en el suelo. La metodología propuesta y utilizada en el presente proyecto se describe a continuación.

Consideración de las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo con presencia de contaminante

Para realizar la comparativa de las propiedades del suelo, se consideraron constantes las relaciones volumétricas entre las fases del suelo y el peso de sólidos (W_s). Si bien el suelo posee tres fases importantes, sólida, líquida y gaseosa, en el

caso particular de los suelos contaminados o sometidos a procesos de biorremediación, el contaminante se consideró dentro de la fase líquida debido a que es complicado cuantificar la cantidad de contaminante presente en el suelo y definirla en una fase propia.

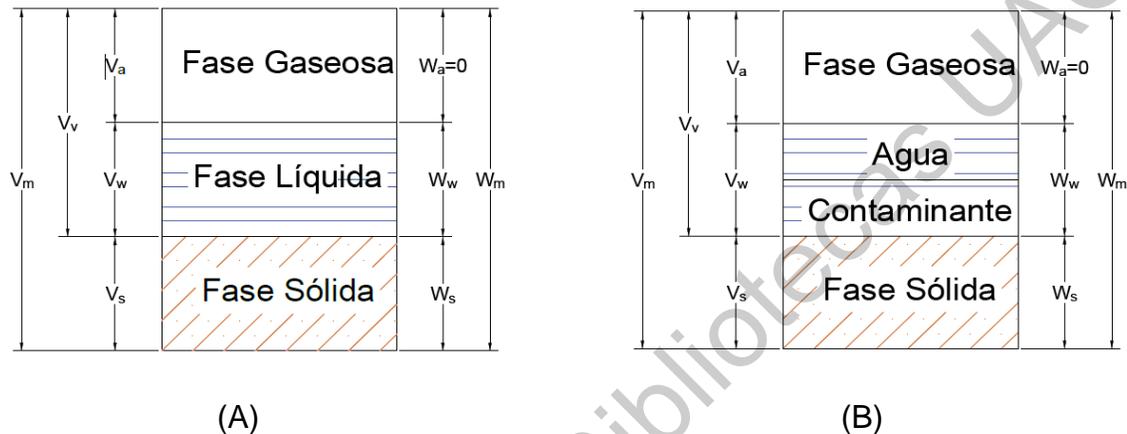


Figura 3.11. Fases del suelo.

Determinación del peso específico o peso volumétrico de la masa del suelo (γ_m) (ASTM D427, 2010)

Suelo natural

Se labró un cubo de una muestra de suelo inalterado de aproximadamente 3cm de lado, se pesó y se obtuvo el peso de la muestra en condiciones naturales (W_m). Posteriormente se sumergió la muestra en un recipiente con mercurio y se enrazó para obtener el mercurio desplazado, el cual fue pesado (W_{Hg}). Conociendo el peso específico del mercurio (γ_{mmHg}), se determinó el peso específico de la muestra (γ_m) en g/cm^3 mediante la siguiente ecuación.

$$\gamma_m = \frac{W_m \times \gamma_{mmHg}}{W_{Hg}} \tag{3.2}$$



Figura 3.12. Determinación del peso específico del suelo.

El procedimiento se llevó a cabo con tres cubos de la misma muestra de suelo inalterado, y se obtuvo un promedio del peso específico del suelo.

Suelo contaminado

Para poder calcular el peso específico del suelo en estado contaminado y la comparativa de las relaciones volumétricas y gravimétricas, se considera como constante el peso de sólidos y conociendo el contenido de humedad inicial del material y el contenido de contaminante agregado, se muestran las relaciones calculadas.

En el suelo contaminado no fue posible cuantificar de forma exacta el contenido de contaminante y agua; que, si bien fue contaminado con un control estricto, no fue posible corroborar las fases del suelo. Por lo tanto, en una muestra inalterada contaminada no existe un ensaye que permita determinar los valores de estos parámetros

Debido a la manipulación del suelo en estado contaminado y sometidos a la remediación mediante atenuación natural y biopilas, el peso específico de los materiales fue determinado de forma analítica, conociendo el contenido de líquidos por diferencia de peso de suelo secado al horno; y manteniendo las relaciones gravimétricas del suelo en estado natural (volumen de sólidos (V_s) y volumen de vacíos (V_v)).

*Contenido de humedad (ω) (ASTM D2216, 2010)**Suelo natural*

El contenido de agua del suelo en estado natural se realizó de forma práctica, mediante pruebas de laboratorio.

Se tomó un cubo de muestra inalterada de suelo en condiciones naturales. La muestra fue pesada y se obtuvo el peso de la muestra húmeda (W_m). Se dejó secar en el horno al menos 16 horas, a una temperatura de 110 ± 5 °C. Cumplido el tiempo de secado, se retiró la muestra del horno y se pesó inmediatamente para obtener el peso de la muestra seca (W_s), y se calculó la diferencia de pesos de la muestra para obtener el peso del agua (W_w).



Figura 3.13. Determinación del contenido de humedad del suelo.

El contenido gravimétrico de agua (ω) se representa porcentualmente y se calcula de la siguiente manera:

$$\omega\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (3.3)$$

Este cálculo fue repetido para tres muestras y se obtuvo un promedio. La prueba se realizó a la brevedad, después de realizar el muestreo, para evitar pérdidas de humedad del suelo.

*Contenido de líquidos ($\ell\%$) (Basado en ASTM D2216, 2010)**Suelo contaminado*

El contenido de líquidos ($\ell\%$) presentado en este apartado, representa la mezcla de agua y contaminante presente en el suelo en estado contaminado, tratado mediante atenuación natural y tratado mediante biopilas; y es el equivalente a contenido de humedad (ω) determinado en el suelo en estado natural.

Su obtención se determinó mediante 1 muestra de suelo (W_m) secada al horno durante 24 horas a 165 ± 5 (W_s), y de la diferencia de estas, se obtuvo el peso de los líquidos presentes en la muestra (W_l),

El contenido de líquidos se calculó similar al contenido de agua, representándolo de forma porcentual y con respecto al peso de sólidos, se calculó haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\ell\% = \frac{W_l}{W_s} \times 100 \quad (3.4)$$

El contenido de líquidos reportado es el promedio de los resultados obtenidos después de tres repeticiones realizadas.

*Peso específico relativo de sólidos (S_s) (ASTM D854, 2014)**Suelo natural*

Se tomó una muestra de suelo que pasó la malla #4 y se dejó secar en el horno a $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Transcurrido el tiempo, se extrajo la muestra y se tomaron $50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de suelo seco (W_s). Se colocó el material en un matraz de 500ml, con 1/3 de su capacidad de agua, aproximadamente, y en otro matraz se colocaron 2/3 de agua. Los matraces se calentaron a baño maría a una temperatura de 80°C para saturar los sólidos con ayuda del calor y acelerara el proceso de desairado. Con una bomba de vacío, se desairaron ambos matraces a una presión de 183

milibares. Se aforó el matraz contenedor de los sólidos, con el agua del segundo matraz. Se limpió perfectamente el cuello del matraz y se tomó el peso (W_{fws}) y la temperatura, con una diferencia de $\pm 5^\circ\text{C}$ entre una lectura y otra. Después de obtener al menos 3 lecturas, y con el uso de la calibración previa del matraz de donde se obtiene el peso del matraz con agua a diferentes temperaturas (W_{fw}), se calculó el peso específico relativo de sólidos (S_s) aplicando la ecuación:

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} - W_{fws} + W_s} \quad (3.5)$$



Figura 3.14. Determinación del peso específico relativo de sólidos del suelo.

Para este procedimiento se realizaron tres repeticiones y se obtuvo un peso específico relativo de sólidos promedio.

Suelo contaminado

Para la realización de la prueba de peso específico relativo de sólidos, se realiza una curva de calibración del peso del matraz y el agua a diferentes temperaturas, mismo que se utiliza para restar dicho peso a las temperaturas específicas requeridas para la determinación del S_s . Sin embargo, al realizar el ensaye en los suelos con presencia de contaminante, este valor de calibración se ve modificado,

debido a que el contaminante presenta una densidad distinta a la densidad del agua. Por lo tanto, en el matraz se genera una mezcla de agua destilada, contaminante y suelo como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15. Mezcla de agua destilada, contaminante y suelo generada en el matraz.

La norma ASTM D854-14 permite el uso de adición de calor en el matraz con suelo y agua para acelerar el proceso de saturación del suelo y desairado del agua. Al realizar este procedimiento en el suelo contaminado, se generó una línea de espuma sobre el aforo de líquido contenido en el matraz, misma espuma que hace emerger la materia orgánica presente en el suelo. Razón por la cual se impide la correcta lectura de la línea de aforo en el matraz, así como la limpieza del cuello del matraz por encima de esta línea, ya que esto implicaría eliminar la espuma y la materia orgánica del espécimen (figura 3.16).



Figura 3.16. Espuma generada en la línea de aforo del matraz.

Para evitar la problemática de la curva de calibración, se considera que la cantidad de contaminante es mínima y no modifica de forma significativa dicha curva. Respecto al problema de la espuma, se deja saturar el suelo de forma natural y se evita el uso del calor durante la prueba.

Por lo tanto, se tomó una muestra de suelo que pasó la malla #4 y se dejó secar en el horno a 165 ± 5 °C durante 24 horas. Transcurrido el tiempo, se extrajo la muestra y se tomaron $50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de suelo seco (W_s). Se colocó el material en un matraz de 500ml, con 1/3 de su capacidad de agua, aproximadamente, y en otro matraz se colocaron 2/3 de agua. El material se dejó reposar a temperatura ambiente durante 24 horas para lograr el proceso de saturación. Cumplido el tiempo, se aplicó vacío alrededor de 30 minutos, hasta lograr la nula o mínima presencia de burbujas de aire en el matraz con muestra sólida. La presión utilizada para el desaire de ambos matraces fue de 180 milibares. Se aforó el matraz contenedor de los sólidos, con el agua del segundo matraz. Se limpió perfectamente el cuello del matraz y se tomó lectura de peso (W_{fws}) y temperatura, con ± 5 °C de diferencia

entre una lectura y otra. Después de obtener al menos 3 lecturas, y con el uso de la calibración previa del matraz de donde se obtiene el peso del matraz con agua a diferentes temperaturas (W_{fw}), se calculó el peso específico relativo de sólidos (S_s) aplicando la ecuación (3.5).



Figura 3.17. Determinación de peso específico relativo de sólidos en suelo con contaminante.

El procedimiento se realizó tres veces y se obtuvo un promedio de los resultados obtenidos.

Análisis granulométrico vía seca (por tamices) (ASTM D6913-1913M, 2017)

Suelo natural

Del suelo, sometido a secado, se obtuvo una muestra representativa que fue sometida a la prueba de tamizado por mallas (1/4", N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 100 y N° 200). El retenido de cada tamiz fue pesado y se determinó el porcentaje que representa de la muestra total. Con los datos obtenidos se elaboró la curva granulométrica, graficando el porcentaje acumulado de cada malla vs el tamaño de

las partículas. De esta forma se determinó el porcentaje de grava, arena y finos que conformaban la muestra.



Figura 3.18. Análisis granulométrico por tamizado.

Este procedimiento se realizó tres veces con muestras de suelo alterada, y se calculó un promedio de los porcentajes de grava, arena y finos.

Análisis granulométrico vía húmeda (por hidrómetro) (ASTM D422-63, 2007)

Suelo natural

Se tomaron 50 g de muestra de suelo tamizado por la malla #200, se colocó en un recipiente con una solución de 125ml de defloculante, hexametáfosfato de sodio, al 4% y se dejó reposar durante al menos 16 horas. Pasadas las 16 horas se colocó la solución en una probeta de 1000ml y se aforó. Se agitó vigorosamente la probeta durante 1 min y se colocó en una superficie fija y horizontal. Posteriormente se introdujo el hidrómetro y se tomaron lecturas de densidad y temperatura a los 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min; 1 hr 2 hr, 4 hr, 8 hr, 24 hr, 48 hr y hasta obtener una lectura constante de la densidad de la solución. La probeta con material se mantuvo a una temperatura constante de 20 °C. Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de arcillas y limos.



Figura 3.19. Análisis granulométrico por hidrómetro.

Se realizaron tres repeticiones de la granulometría por hidrómetro, y se calculó un promedio de limos y arcillas.

Suelo contaminado

Durante la prueba de granulometría por hidrómetro, al realizar la agitación del suelo indicada en la norma ASTM D422-63, 2007, se genera nuevamente una capa de espuma sobre la muestra de suelo con presencia de contaminante disuelta en agua (figura 4.20), por lo que se realiza una corrección del espesor de espuma generado a la lectura realizada durante la prueba.



Figura 3.20. Espuma generada durante la prueba de hidrómetro.

Límites de consistencia de Atterberg

Suelo natural

Los suelos presentan diferentes consistencias, según su naturaleza y contenido de agua, que lo incluyan en el estado sólido, semi-sólido, plástico o semi-líquido. El contenido de agua o humedad límite al que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro. El método usado para medir estos límites se conoce como método de Atterberg y los contenidos de agua o humedad con los cuales se producen los cambios de estados, se denominan límites de Atterberg.



Figura 3.21. Testigos de humedad de límites de consistencia.

Se tomaron tres submuestras de suelo, y se realizó una repetición con cada submuestra para determinar los límites del material, y se calcularon los promedios.

Límite líquido (LL) (Norma BS 1377-2:1990)

El límite líquido es la frontera entre los estados semilíquido y plástico, y corresponde a una resistencia al corte de 25g/cm^2 .

El límite líquido se determinó mediante el método del Cono Inglés.



Figura 3.22. Determinación del límite líquido mediante cono inglés.

Se tomó una muestra de 250 g de suelo secada al sol. Se tamizó por la malla No 40, se colocó en un recipiente y se le agregó agua hasta obtener una consistencia semilíquida. Se dejó homogeneizar durante al menos 16 horas. Pasado el tiempo, se mezcló perfectamente el material y se colocó en un recipiente con el material enrasado para ser sometido a la prueba de penetración del Cono Inglés, el cual fue calibrado y programado para actuar por cinco segundos, en un rango de 14 mm a 26 mm de penetración. Se tomaron testigos de humedad, de al menos 5 g, en los puntos calculados y se sometieron al horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. El límite líquido se determinó mediante el cálculo de la humedad del material con relación a 20 mm de penetración.

Límite plástico (LP) (ASTM D4318, 2017)

Para el cálculo del límite plástico, se tomó una pequeña porción del material preparado para el cálculo de los límites de Atterberg con la consistencia de una plastilina, y se realizaron rollitos de 3 mm de diámetro. Se colocaron los rollitos en un vidrio de reloj hasta juntar 6 (seis) g de material (W_{mw}), se colocaron en el horno de forma inmediata durante al menos 16 horas a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

y se obtuvo el peso seco de la muestra (W_{ms}). Para determinar el límite plástico del material, se obtuvo el contenido de agua mediante la siguiente ecuación:

$$LP(\%) = \frac{W_{mw} - W_{ms}}{W_{ms}} \times 100 \quad (3.6)$$



Figura 3.23. Determinación del límite plástico.

Índice plástico (IP) (ASTM D4318, 2017)

El Índice de Plasticidad (IP), es la diferencia del LL y el LP, y es un parámetro que permite la clasificación del suelo. Se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$IP(\%) = LL - LP \quad (3.7)$$

Contracción lineal (ASTM D4318, 2017)

Durante el proceso de determinación de límites, cuando el material se encontró lo más próximo al límite líquido (20 mm de penetración), se tomó una muestra del material y se colocó, en tres capas, en una barra metálica para medir la contracción lineal previamente engrasada. Se dejó secar de manera paulatina en la cámara de temperatura hasta obtener una humedad mínima y se procedió a colocar en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante al menos 16 horas. Pasado el lapso de tiempo, se retiró la barra del horno y se sacó el material de la barra de acero. Se tomaron medidas de la longitud de la barra de acero (L_o), y de la barra de material

seco (L_f) y se procedió al cálculo de la contracción lineal mediante la aplicación de la ecuación descrita a continuación:

$$CL(\%) = \frac{L_o - L_f}{L_o} \times 100 \quad (3.8)$$



Figura 3.24. Determinación del límite de contracción lineal.

Límite de contracción (LC) (ASTM D427, 2010)

El proceso para la determinación del límite de contracción es similar al descrito anteriormente, la diferencia radica en que el material humectado se vacía en una caja Petri para determinar su cambio de volumen. Se tomó una muestra de material cercana a la consistencia del límite líquido y se colocó, en tres capas, en la caja Petri. Se pesó la caja Petri con el material húmedo (W_m) y enseguida fue dispuesto a un proceso de secado lento en la cámara de temperatura a 20 °C para después ser sometido a secado en el horno a una temperatura de 110 °C \pm 5°C durante al menos 16 horas. Previamente se tomaron medidas de la caja Petri para el cálculo de su volumen (V_0).



Figura 3.25. Determinación del límite de contracción volumétrica.

Como etapa última de este proceso, se pesó la caja Petri con el material seco (W_s) y se determinó el volumen de la pastilla (V_f) mediante la inmersión de mercurio.

La siguiente expresión fue utilizada para el cálculo del límite de contracción:

$$LC(\%) = \left[\frac{W_m - W_s - \gamma_0(V_0 - V_f)}{W_s} \right] \times 100 \quad (3.9)$$

Suelo contaminado

Para la determinación de los límites de consistencia en el suelo con presencia de contaminante, se utilizó el contenido de líquidos, solución de contaminante y agua en proporciones no determinadas, como parámetro similar a la humedad.

Se realizaron tres repeticiones de los ensayos en cada etapa y se obtuvo un promedio de los resultados obtenidos.

Límite líquido (LL) (Norma BS 1377-2:1990)

El límite líquido es la frontera entre los estados semilíquido y plástico, corresponde a una resistencia al corte de 25 g/cm².

El límite líquido se determinó mediante el método del Cono Inglés.

Se tomó una muestra de 250 g en las condiciones de contaminado, atenuación natural y bioestimulación, respectivamente, se colocó en un recipiente y se le agregó agua hasta obtener una consistencia semilíquida del material. Se dejó

homogeneizar durante al menos 24 horas. Pasado el tiempo, se mezcló perfectamente el material y se colocó en un recipiente con el material enrasado para ser sometido a la prueba de penetración del Cono Inglés, el cual fue calibrado y programado para actuar por cinco segundos, en un rango de 14 mm a 26 mm de penetración. El límite líquido se determinó mediante el cálculo del contenido de líquidos del material con relación a los 20 mm de penetración.



Figura 3.26. Expulsión de contaminante de la muestra contaminada durante la determinación del límite líquido.

Para el suelo contaminando, debido al agua agregada, el suelo mino parte del contaminante presente por lo que se permitió una estabilización del material durante 24-48 horas y después se realizó el procedimiento descrito.

Límite plástico (LP) (ASTM D4318, 2017)

Para el cálculo del límite plástico, se tomó una pequeña porción del material preparado, homogeneizado y estabilizado para el cálculo de los límites de Atterberg con la consistencia de una plastilina, y se realizaron rollitos de 3 mm de diámetro. Se colocaron los rollitos en un vidrio de reloj hasta juntar 6 g de material (W_{mw}), se colocaron en el horno de forma inmediata durante al menos 24 horas a una temperatura de $165\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ y se obtuvo el peso seco de la muestra (W_{ms}). Para determinar el límite plástico del material, se obtuvo el contenido de líquidos mediante la ecuación (3.7).

Contracción lineal (ASTM D4318, 2017)

Durante el proceso de determinación de límites, cuando el material se encontró lo más próximo al límite líquido (20 mm de penetración), se tomó una muestra del material y se colocó, en tres capas, en una barra de contracción lineal previamente engrasada. Se dejó secar de manera paulatina en la cámara de temperatura hasta obtener un contenido de líquidos mínima y se procedió a colocar en el horno a una temperatura de 165 ± 5 °C durante al menos 24 horas. Pasado el lapso de tiempo, se retiró la barra del horno y se sacó el material de la barra de acero. Se tomaron medidas de la longitud de la barra de acero y de la barra de material seca y se procedió al cálculo de la contracción lineal mediante la aplicación de la ecuación (3.8).



Figura 3.27. Determinación del límite de contracción lineal en suelo con contaminante.

Límite de contracción (LC) (ASTM D427, 2010)

El proceso para la determinación del límite de contracción es similar al descrito anteriormente, la diferencia radica en que el material humectado es vaciado, también en tres capas, en una caja Petri. Se tomó una muestra de material cercana a la consistencia del límite líquido y se colocó, en tres capas, en la caja Petri. Se pesó la caja Petri con el material húmedo (W_m) y enseguida fue dispuesto a un proceso de secado lento en la cámara de temperatura para después ser sometido

a secado en el horno ($165\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante al menos 24 horas. Previamente se tomaron medidas de la caja Petri para el cálculo de su volumen (V_0).



Figura 3.28. Determinación del límite de contracción volumétrica en suelo con contaminante.

Como etapa ultima de este proceso, se pesó la caja Petri con el material seco (W_s) y se terminó el volumen de la pastilla (V_f) mediante la inmersión de mercurio.

Para el cálculo del límite de contracción se empleó la ecuación (3.9)

Clasificación SUCS (ASTM D2487, 2014)

Con los porcentajes granulométricos, obtenidos para cada repetición, mediante el tamizado por vía seca se clasificó el suelo como grava, arena o fino. Por otro lado, considerando el límite plástico y el índice de plasticidad, se procedió a la clasificación del porcentaje de suelo fino mediante el uso de la carta de plasticidad de Casagrande. (Figura 3.13).

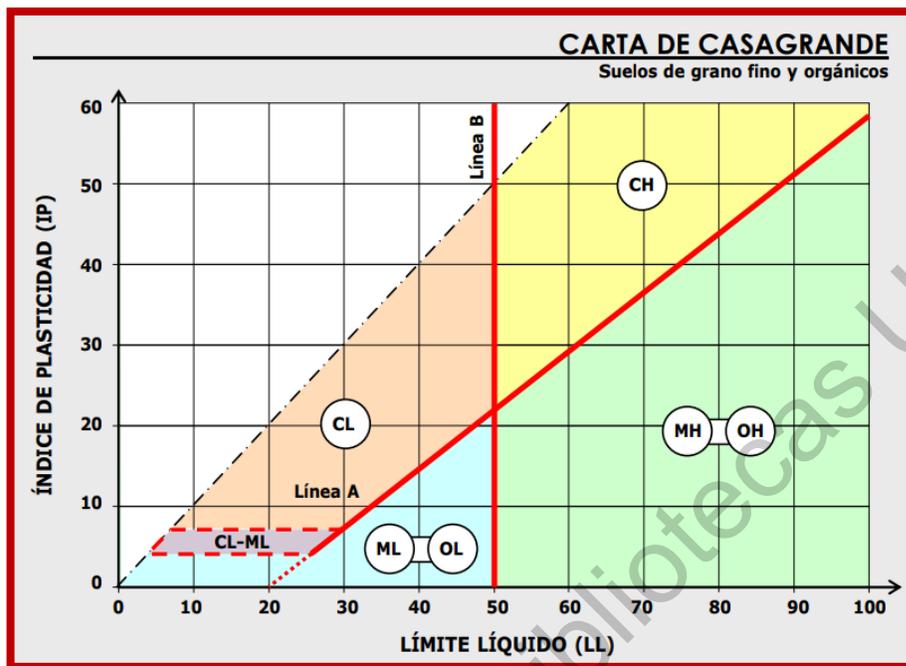


Figura 3.29. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Fuente: Bañón Blásquez y Beviá García (2000)

Resistencia al esfuerzo cortante (ASTM D3080/3080M, 2011)

De acuerdo con la norma, se remoldearon las probetas de suelo, respetando las condiciones de peso específico iniciales del suelo natural, del suelo contaminado y del suelo sometido a los procesos de biorremediación, respectivamente. Se montaron en el anillo de corte directo con cargas inmediatas de 0.25, 0.50 y 1 kg/cm², equivalentes a 25 kPa, 50 kPa y 100 kPa respectivamente; esto de acuerdo a la normativa citada. Las probetas se dejaron consolidar durante 48 horas bajo la carga normal. Seguidamente se realizó la prueba de corte directo a una velocidad de deformación de 1 mm/min, y se detuvo la prueba cuando la probeta alcanzó una deformación horizontal del 15% de la longitud de la muestra.



Figura 3.30. Determinación de la resistencia al esfuerzo cortante.

Para la prueba de corte directo se tomó como referencia el contenido de líquidos en el suelo contaminado, y se reprodujo esta misma condición en el suelo natural y el suelo remediado, para mantener las probetas bajo condiciones similares y realizar la comparativa de los resultados obtenidos. Las probetas no fueron saturadas debido a que esto ocasionaba el desplazamiento parcial del contaminante en el suelo contaminado y biorremediado en dichas probetas.

Curva de calibración mediante el método de obtención del contenido de materia orgánica

Se tomaron muestras de 50 g de suelo natural secado a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se contaminaron con diésel al 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20% y 25% con respecto al peso seco del material, y se registraron los pesos. Se dejó reposar el material durante 24 horas para permitir la correcta homogeneización del material con el contaminante y posteriormente se dejó secar al horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante otras 24 horas, como lo indica la norma de determinación de contenido de materia orgánica y pasado el tiempo se registraron los nuevos pesos.

Se realizó el mismo proceso, pero con un porcentaje de humedad inicial del material del 30%.

Por último, se colocó el material en la muflla a una temperatura de 550 grados durante 1 hora, para incinerar la materia orgánica contenida en las muestras de

suelo, transcurrido el tiempo, se registraron los pesos de las cenizas, se realizó el cálculo con la ecuación (3.1).



Figura 3.31. Material contaminado en diferentes porcentajes con respecto al peso seco del suelo.

Los resultados obtenidos se graficaron para relacionar el contenido de materia orgánica presente en el suelo con el contenido de contaminante.

Esta propuesta para la determinación del contenido de contaminante presente en el suelo también se realizó con muestras de suelo secadas al sol, para simular las condiciones del suelo que fue sometido a la contaminación para el desarrollo de la investigación.

Capítulo IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dirección General de Bibliotecas UAQ

IV. Resultados y discusión

Los cálculos y resultados producto de los ensayos descritos en el capítulo 3 para la caracterización del suelo, se muestran en los apéndices A, B y C.

El valor presentado para cada propiedad y antecedido por el símbolo (\pm) corresponde a la desviación estándar de los promedios obtenido en cada ensayo, de los cuales se realizaron tres repeticiones.

IV.1 Caracterización química

IV.1.1 pH y materia orgánica

IV.1.1.1 Suelo natural vs suelo contaminado

Debido a la adición del contaminante en el suelo, y a que este es un compuesto de origen orgánico, el contenido de materia orgánica se ve aumentado en el suelo contaminado, pasando de 5.73% a 8.67%. Por otro lado, el contaminante acidifica el suelo, llevándolo de un pH de 7.94 a 6.98, un punto por debajo del pH del suelo no contaminado, como se observa en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Contenido de materia orgánica y pH del estado natural vs contaminado del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Natural</i>	<i>Suelo Contaminado</i>
<i>Materia Orgánica</i>	<i>MO</i>	<i>%</i>	5.73 ± 0.48	8.67 ± 0.79
<i>pH</i>	<i>pH</i>	<i>adimensional</i>	7.95 ± 0.14	6.98 ± 0.03

El aumento de la materia orgánica se debe a un aumento en los restos de origen animal y/o vegetal, como bacterias y hongos, presentes en el suelo (Pereira *et al.*, 2011), pudiendo ser estos provenientes de contaminante de origen orgánico (Jiménez, 2008). Sin embargo, debido a la acidificación del suelo, la actividad microbiana se ve reducida (Pereira *et al.*, 2011). El aumento de MO, puede generar una mayor superficie específica, característica propia de las arcillas, lo que aumentaría la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

IV.1.1.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

De acuerdo a la tabla 4.2, el contenido de materia orgánica en el suelo tratado mediante biopilas se ve aumentado de 8.67% a 11.19%, con una variación estándar mínima; aunado a un pH del suelo neutral en el estado tratado mediante biopilas, con una varianza no significativa, se cree que existe un aumento de microorganismos en el suelo. De acuerdo con Ramos y Zuñiga (2008), las bacterias en general están asociadas a suelos neutros, que es el caso del suelo tratado mediante las biopilas.

Tabla 4.2. Contenido de materia orgánica y pH del estado contaminado vs biopilas del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Biopilas</i>
<i>Materia Orgánica</i>	<i>MO</i>	<i>%</i>	8.67 ± 0.79	11.19 ± 0.51
<i>pH</i>	<i>pH</i>	<i>adimensional</i>	6.98 ± 0.03	7.09 ± 0.06

IV.1.1.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

El contenido de materia orgánica se ve aumentado de 8.67% a 10.40%, con una variación estándar mínima. Por otro lado, el material continúa acidificándose en el tiempo, durante el proceso de atenuación natural, reportando un pH de 6.66, por debajo del 6.98 en el suelo contaminado, con una varianza significativa entre ambos estados como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Contenido de materia orgánica y pH del estado contaminado vs atenuación natural del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Atenuación Natural</i>
<i>Materia Orgánica</i>	<i>MO</i>	<i>%</i>	8.67 ± 0.79	10.40 ± 0.12
<i>pH</i>	<i>pH</i>	<i>adimensional</i>	6.98 ± 0.03	6.66 ± 0.03

La adición del contaminante en el suelo, genera una mayor disponibilidad de carbono, por encima de lo requerido por el suelo, lo que produce la acidificación del

suelo y provoca una baja actividad microbiana según lo presentado por Pereira *et al.*, (2011).

Comparando el pH de los procesos de biorremediación, se puede observar que el suelo tratado mediante biopilas presenta un grado neutro de acidez, lo que favorece el crecimiento bacteriano (Alarcón y Ferrera-Cerrato, 2013).

IV.1.2 Capacidad de Intercambio catiónico

IV.1.2.1 Suelo natural vs suelo contaminado

Tabla 4.4. Capacidad de intercambio catiónico del estado natural vs contaminado del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Natural</i>	<i>Suelo Contaminado</i>
<i>Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	<i>CIC</i>	<i>Cmol(+)/kg</i>	45.94	38.41

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-12, con acetato de amonio, la capacidad de intercambio catiónico del suelo natural es muy alta, mientras que el suelo contaminado ve disminuida esa capacidad, entrando en un rango de CIC alta. Hay que recordar que de acuerdo con Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (2014), a mayor acidez, mayor CIC, lo cual es contrario a lo mostrado en los resultados presentes, donde al comparar los pH de los estados del suelo en estudio (Tabla 4.1) y su respectivo valor de CIC, el suelo natural, el cual presenta una mayor alcalinidad que el suelo contaminado, presenta valores más alto de CIC que el suelo contaminado.

IV.1.2.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

Tabla 4.5. Capacidad de intercambio catiónico del estado contaminado vs biopilas del suelo.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Contaminado	Biopilas
Capacidad de Intercambio Catiónico	CIC	Cmol(+)/kg	38.41	36.16

De acuerdo a la tabla 4.5, la variación de la capacidad del intercambio catiónico es de 2.25 puntos, y de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-12, con acetato de amonio, ambos valores se mantienen en un rango de capacidad de intercambio catiónico alta, lo que indica una variación no significativa entre ambos valores. Esta clasificación en ambos casos, está directamente relacionada con la variación no significativa del pH del suelo en ambos estados, como se indica en la tabla 4.2.

IV.1.2.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

Tabla 4.6. Capacidad de intercambio catiónico del estado contaminado vs atenuación natural del suelo.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Contaminado	Atenuación Natural
Capacidad de Intercambio Catiónico	CIC	Cmol(+)/kg	38.41	14.57

La variación de la capacidad del intercambio catiónico del suelo tratado mediante atenuación natural se ve disminuida en un 62% con respecto de la CIC del suelo en estado contaminado (CIC alta), cayendo en una categoría de CIC baja de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 Método AS-12, con acetato de amonio. De acuerdo con los resultados presentados anteriormente en la misma sección de capacidad de intercambio catiónico, en la comparativa del suelo en estado contaminado y el suelo tratado mediante atenuación natural, la CIC se ve reducida, estado relacionada

directamente con la disminución del pH del suelo tratado mediante atenuación natural, como se reporta en la tabla 4.3 y coincidiendo con lo mencionado por Juárez-Badillo y Rico Rodríguez (2014), con respecto al pH del suelo

IV.2 Superficie específica

IV.2.1 Suelo natural vs suelo contaminado

El suelo natural presentó una superficie específica de 276.06 m²/g, mientras que el suelo en estado contaminado aumentó, presentando 281.50 m²/g de superficie específica, como se observa en la tabla 4.7. Esto representa un aumento de 5.55 m²/g del suelo contaminado con respecto al suelo en estado natural (a que se debió el incremento de la superficie específica). Sin embargo, ambos suelos muestran una presencia de montmorillonita como mineral arcilloso. Existe alguna repercusión en el comportamiento geotécnico del suelo debido a este incremento de la superficie específica.

Tabla 4.7. Superficie específica en el estado natural vs contaminado del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Natural</i>	<i>Suelo Contaminado</i>
<i>Superficie Específica</i>	S_E	m^2/g	276.06 ± 20.13	281.50 ± 21.59

IV.2.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

La superficie específica del suelo tratado mediante biopilas, es similar a la superficie del suelo en estado contaminado, observando así el mínimo cambio del material, pero conservando la presencia del material de montmorillonita en el porcentaje de arcilla presente, como se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Superficie específica en el estado contaminado vs biopilas del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Biopilas</i>
<i>Superficie Específica</i>	S_E	m^2/g	281.50 ± 21.59	280.82 ± 33.67

IV.2.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

De acuerdo con la tabla 4.9, el suelo tratado mediante atenuación natural presentó un aumento del 38% de la superficie específica con respecto a la presentada en el suelo en estado contaminado.

Tabla 4.9. Superficie específica en el estado contaminado vs atenuación natural del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Atenuación Natural</i>
<i>Superficie Específica</i>	S_E	m^2/g	281.50 ± 21.59	390.29 ± 41.07

Para los tres casos, el suelo presenta una superficie específica que clasifica el material con mineral de montmorillonita. Sin embargo, el aumento de la superficie específica del suelo en el estado de atenuación natural se debe a la presencia del contaminante. Es necesario recordar el comportamiento hidrófobo del contaminante, el cual, al rodear las partículas de suelo, altera el comportamiento de la doble capa difusa disminuyendo la fuerza de atracción de las partículas de arcilla con el agua e impidiendo que el azul de etileno rodee toda la partícula de arcilla, esto como consecuencia de la variación en la constante dieléctrica del agua ($\epsilon = 80.3$) y el diésel ($\epsilon = 2.1$), la cual indica la capacidad de un medio para conducir electricidad (Izdebska-Mucha y Trzcinski, 2008). En el caso de las biopilas, la superficie específica se mantiene constante, debido al proceso de remediación acelerado en el suelo, lo que indica una efectividad del tratamiento de remediación. Sin embargo, es necesario aclarar, que el método de azul de metileno está calibrado para un suelo ante presencia de agua como líquido, por tanto, al realizar la prueba se provoca un error en la medición de la superficie específica del suelo contaminado.

IV.3 Caracterización geotécnica

IV.3.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas

IV.3.1.1 Suelo natural vs suelo contaminado

En la tabla 4.10 se muestra el peso específico del suelo contaminado con respecto al suelo en estado natural, el cual tiene una disminución de 0.26 t/m^3 en el suelo contaminado debido a que la densidad del contaminante (0.832 g/cm^3) es menor que la densidad del agua (1 g/cm^3), lo que indica un menor peso de la muestra contenido en un mismo volumen para ambos estados.

El contenido de líquidos, que representa una mezcla de agua y contaminante, es del 13.33%, representando este el mayor porcentaje de absorción de contaminante para este suelo en particular, y con las características de humedad que presentaba el suelo en estado natural secado al sol (8%). Este valor indica que el suelo se encontraba a un contenido de humedad menor referente al suelo en estado natural, el cual reportó una humedad del 36.11%. Como consecuencia de esta variación de humedad, el porcentaje de contaminante retenidos no simulara de forma exacta el retino de contaminante del suelo en campo, habiendo una variación en este retenido directamente proporcional al contenido de humedad inicial del material.

La gravedad específica del suelo contaminado es de 2.60, es decir, 0.13 puntos menos que la densidad de sólidos del suelo natural, siendo esta una varianza significativa de gravedad específica. Esto como consecuencia de un proceso de oxidación del suelo contaminado, capacidad reductora u oxidativa del suelo. Tal atributo se encuentra estrechamente vinculado con la aireación así como con el pH, ya que ambos condicionan tanto la actividad microbiana como el tipo de reacciones que acaecen en él.

Tabla 4.10. Relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo natural vs contaminado.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Natural	Suelo Contaminado
Peso Específico	γ_m	t/m^3	1.54 ± 0.05	1.28
Contenido de líquidos	ω/l	%	36.11 ± 0.77	13.33 ± 0.32
Gravedad Específica	S_s	adimensional	2.73 ± 0.01	2.60 ± 0.01
Relación de Vacíos	e	adimensional	1.41	1.30
Porosidad	n	%	58.55	56.48
Grado de Saturación	G_w	%	69.77	16.03

La porosidad y la relación de vacíos son casi similares, esto debido a las consideraciones que se tomaron de preservar las relaciones volumétricas del suelo para simular las condiciones del suelo natural, pero sustituyendo el agua por el contaminante.

El grado de saturación es de 16.03% en el suelo contaminado mientras que en el suelo natural es de 45.31%, esto debido a la diferencia en el contenido de humedades o líquidos entre ambos suelos.

IV.3.1.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

El peso específico en ambo estado se mantiene sin variaciones significativas, sin embargo, el contenido de líquidos se ve aumentado en el suelo tratado con biopilas. Este cambio genera una modificación en el grado de saturación del suelo tratado mediante biopilas.

Nuevamente, vemos un cambio significativo en los valores de la gravedad específica, como se muestra en la tabla 4.11, mientras que la relación de vacíos y la porosidad se mantienen sin variaciones significativas.

Tabla 4.11. Relaciones volumétricas y gravimétricas del estado contaminado vs biopilas.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Biopilas</i>
<i>Peso Específico</i>	<i>l</i>	%	1.28	1.29
<i>Contenido de Líquidos</i>	γ_m	t/m^3	13.33 ± 0.32	14.29 ± 0.27
<i>Gravedad Específica</i>	S_s	<i>adimensional</i>	2.60 ± 0.01	2.47 ± 0.06
<i>Relación de Vacíos</i>	<i>e</i>	<i>adimensional</i>	1.30	1.18
<i>Porosidad</i>	<i>n</i>	%	56.48	54.19
<i>Grado de Saturación</i>	G_w	%	16.03	23.86

IV.3.1.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

De acuerdo a la tabla 4.12, en el suelo tratado mediante atenuación natural, se preservaron las consideraciones realizadas en el suelo contaminado, de mantener constante el peso de sólidos y las relaciones volumétricas del suelo. Por lo que, al determinar el peso específico, este se ve ligeramente aumentado como consecuencia en el aumento del contenido de líquidos del suelo contaminado siendo así un peso de $1.30 t/m^3$ para el suelo en atenuación natural y de $1.28 t/m^3$ en el suelo contaminado, sin variaciones significativas.

En comparación con el suelo en estado contaminado, el suelo en atenuación natural presenta un contenido de líquidos de 15.14%, viéndose aumentados el contenido de líquidos y la materia orgánica, por la presencia del contaminante de origen orgánico y la humedad absorbida del ambiente. Esto impacta en el suelo tratado mediante atenuación natural, aumentado su grado de saturación en 4.25%, respecto del 26.62% calculado en el suelo contaminado, pero manteniendo las relaciones volumétricas constante entre ambos suelos.

Tabla 4.12. Relaciones volumétricas y gravimétricas del estado contaminado vs atenuación natural del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Atenuación Natural</i>
<i>Peso Específico</i>	γ_m	t/m^3	1.28	1.30
<i>Contenido de Líquidos</i>	l	%	13.33 ± 0.32	15.14 ± 0.90
<i>Gravedad Específica</i>	S_s	<i>adimensional</i>	2.60 ± 0.01	2.53 ± 0.01
<i>Relación de Vacíos</i>	e	<i>adimensional</i>	1.30	1.24
<i>Porosidad</i>	n	%	56.48	55.28
<i>Grado de Saturación</i>	G_w	%	16.03	20.08

La gravedad específica del suelo en atenuación natural se ve disminuida, en este caso, por el efecto de la oxidación de las partículas del suelo como consecuencia de un proceso químico.

Esto como consecuencia de un proceso de oxidación del suelo contaminado, capacidad reductora u oxidativa del suelo. Tal atributo se encuentra estrechamente vinculado con la aireación así como con el pH, ya que ambos condicionan tanto la actividad microbiana como el tipo de reacciones que acaecen en él.

Debido a que la densidad y las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo dependen de la cantidad de partículas del suelo, y el tamaño de las mismas, como consecuencia de los movimientos de tierra y los procesos aplicados (Pérez, Iturbide, y Flores, 2006), están se ven alteradas, sin embargo, de acuerdo a las consideraciones para su análisis, trataron de conservarse las relaciones.

Para todos los casos, el matraz se calibra para un solo tipo de líquido, agua; sin embargo, en el suelo contaminado existe una presencia de contaminante que afecta la curva de calibración del matraz, modificándose así el peso del matraz a diferentes temperaturas y con diferentes porcentajes de contaminante. Se requiere afinar una

metodología que pueda permitir la correcta calibración del matraz y líquidos que interfieran en el suelo para determinar de forma adecuada la densidad de sólidos.

IV.3.2 Granulometría

IV.3.2.1 Suelo natural vs suelo contaminado

En la figura 4.1, y apoyándose en la tabla 4.13, se puede apreciar que la granulometría del suelo contaminado se ve modificada respecto a la del suelo en estado natural, viéndose aumentado el porcentaje de limos en 19.70% con una desviación estándar del 0.70%. Por consecuencia las arcillas se ven reducidas 18.55%, con una desviación de 0.70%. Este hecho se ve presentado por el efecto del contaminante, el cual al ser más viscoso que el agua, actúa como conglomerante entre las partículas del suelo.

Tabla 4.13. Granulometría en los estados natural vs contaminado del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Natural</i>	<i>Suelo Contaminado</i>
<i>Gravas</i>	%	0.25 ± 0.06	0.02 ± 0.03
<i>Arenas</i>	%	7.35 ± 0.44	6.43 ± 0.19
<i>Limos</i>	%	52.02 ± 1.82	71.72 ± 0.70
<i>Arcillas</i>	%	40.38 ± 2.30	21.83 ± 0.70

Por otro lado, las arenas se ven disminuidas de 7.35% a 6.43% debido a un posible proceso de oxidación de las partículas como consecuencia de la presencia del contaminante en el suelo.

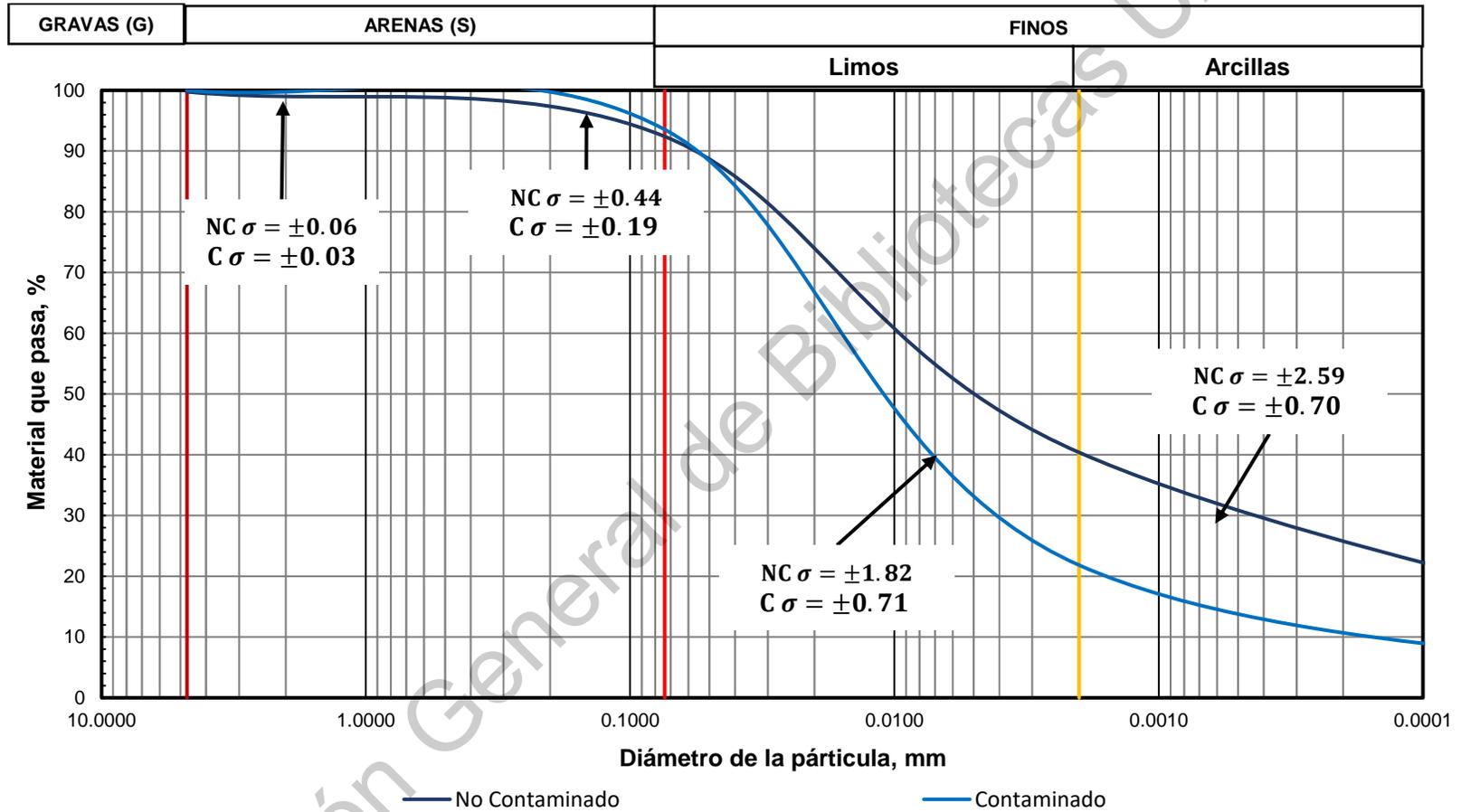


Figura 4.1. Promedios de granulometría en los estados natural vs contaminado del suelo.

IV.3.2.2 Suelo tratado contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

De acuerdo a los porcentajes de gravas, arenas, limos y arcillas presentados en la tabla 4.14. El mayor cambio se ve observando en los suelos que pasan la malla No. 4, donde el porcentaje de arcillas se ve disminuido de 21.83 a 3.18%, generando así, como lo indica la norma de clasificación SUCS, una presencia de arcillas en la granulometría del suelo. Los limos se ven disminuidos también, presentando el 71.72% en el suelo contaminando y haciendo una transición al 45.10% en el suelo tratado mediante las biopilas.

Tabla 4.14. Granulometría en los estados contaminado vs biopilas del suelo.

Parámetro	Unidad	Suelo Contaminado	Biopilas
Gravas	%	0.02 ± 0.03	0.13 ± 0.17
Arenas	%	6.43 ± 0.19	51.90 ± 11.85
Limos	%	71.72 ± 0.70	45.10 ± 10.43
Arcillas	%	21.83 ± 0.70	3.18 ± 0.81

Como consecuencia de estos cambios, el porcentaje de arenas se ve aumentado de 6.43% a 51.90%, con una desviación de 11.85; donde, de acuerdo a Álvarez da silva (2016), el material secretado por los microorganismos presentes en el suelo funciona como un polímero, permitiendo que las partículas se unan entre sí, y aumentado el diámetro de las partículas. Este cambio en la granulometría es contrario a lo reportado por Gómez *et al.*, (2009), para el suelo remediado mediante los mismos procesos. Este cambio tan abrupto de porcentajes granulométricos se observa mejor en la figura 4.2.

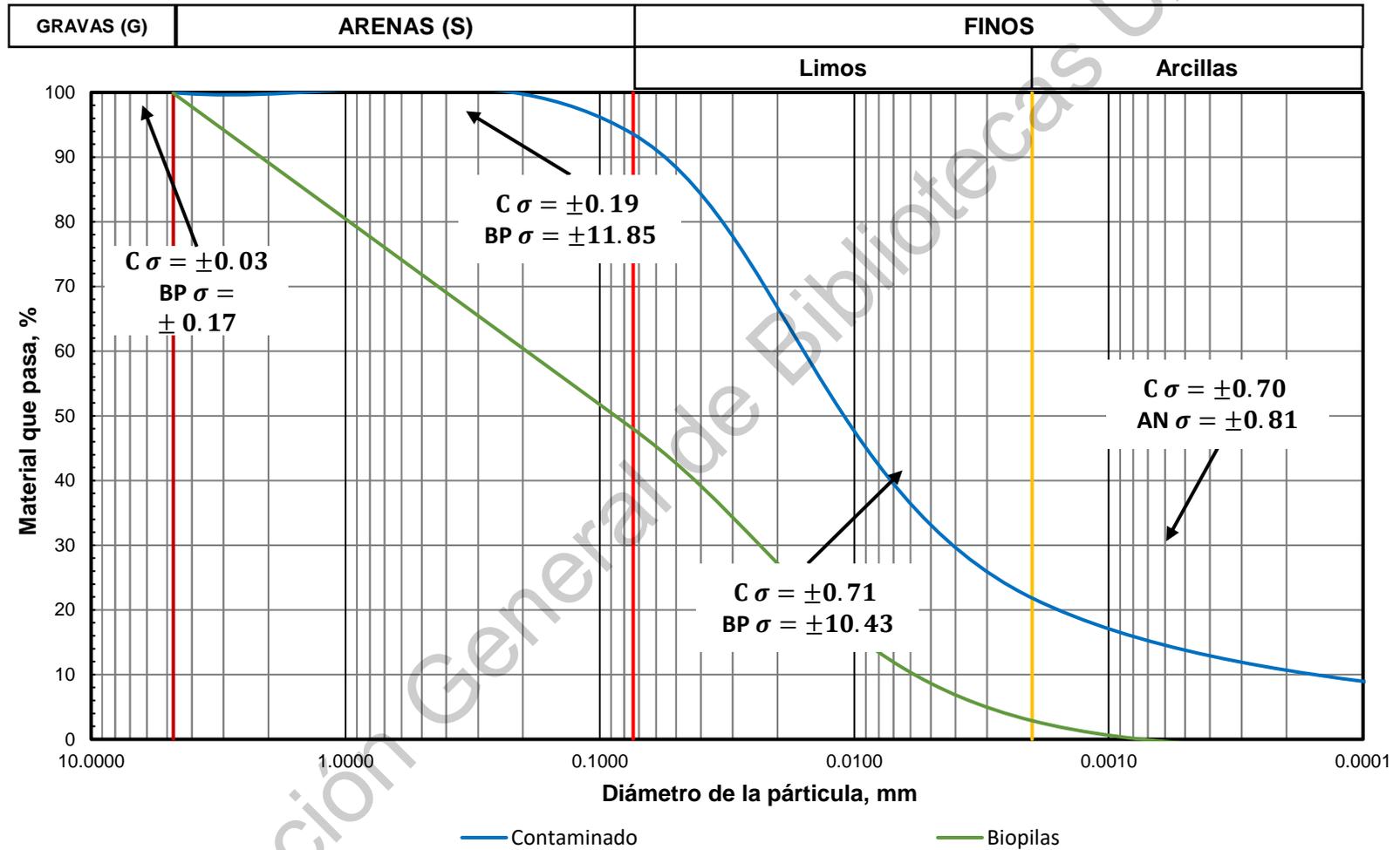


Figura 4.2. Promedios de granulometría en los estados contaminado vs biopilas del suelo.

IV.3.2.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

Como se muestra en la figura 4.3 y la tabla 4.15, la granulometría del suelo tratado mediante atenuación natural muestra que, con el transcurso del tiempo, los limos que se vieron amentados durante el estado de contaminación del suelo, en este proceso se ven disminuidos en un 16.08%, con una desviación de 4.45, como consecuencia de un proceso de oxidación presente en el suelo. Debemos recordad que el proceso de oxidación depende del pH del suelo, así como de los minerales presentes en el mismo, y este se ve modificado al cambiar cualquiera de los anteriores, además de mencionar que a mayores contenidos de humedad existirán procesos redox más altos (FAO, 2019).

Las arcillas aumentaron de 21.83 a 36.63%, observando que, si bien en el estado contaminando se ven conglomeradas, pasado el tiempo de tratamiento de la atenuación natural, las partículas se ven reducidas aumentando este porcentaje. Las arenas, por otro lado, se mantienen casi constantes.

Tabla 4.15. Granulometría en los estados contaminado vs atenuación natural del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Atenuación Natural</i>
Gravas	%	0.02 ± 0.03	0.77 ± 0.21
Arenas	%	6.43 ± 0.19	6.97 ± 0.05
Limos	%	71.72 ± 0.70	55.63 ± 4.45
Arcillas	%	21.83 ± 0.70	36.63 ± 4.32

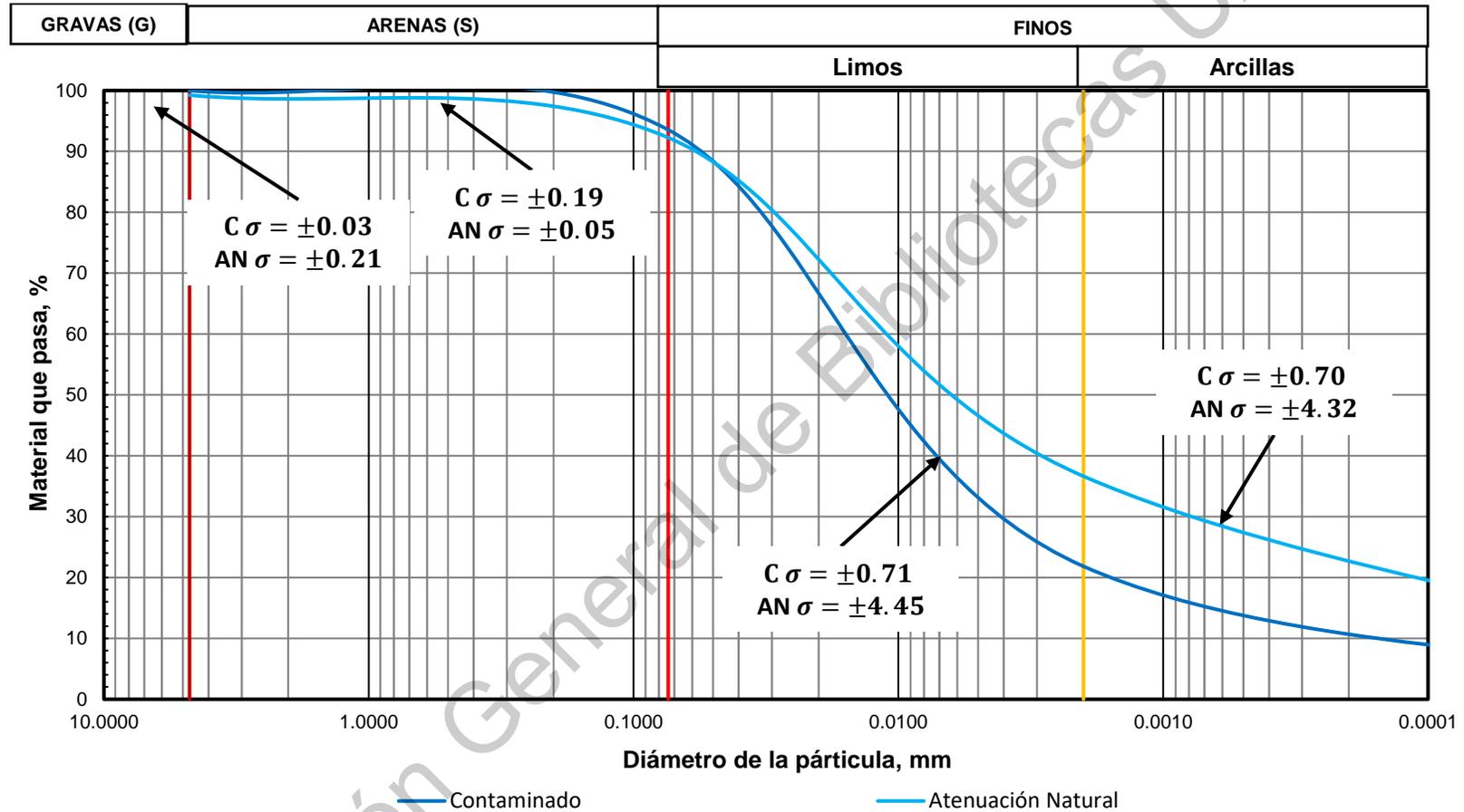


Figura 4.3. Promedios de granulometría en los estados contaminado vs atenuación natural del suelo.

IV.3.3 Límites de consistencia

IV.3.3.1 Suelo natural vs suelo contaminado

En la tabla 4.16 se presentan los límites de consistencia del suelo en estado natural y en estado contaminado, y se observa que los límites del suelo contaminando se ven ligeramente modificados con respecto del suelo en estado natural. El límite líquido aumentó de 77.25% a 83.98%, con una desviación estándar de 1.91 en el último, el límite plástico paso de 35.78% a 37.31%, por lo que el índice plástico también se vio aumentado de 41.47% a 46.67%. Este aumento se presenta como consecuencia de la rigidización del suelo ante la presencia del contaminante, que al aumentar, requiere mayor cantidad de agua para plastificarse o pasar al estado líquido.

Tabla 4.16. Límites de consistencia en los estados natural vs contaminado del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Natural</i>	<i>Suelo Contaminado</i>
<i>Límite líquido</i>	<i>LL</i>	%	77.25 ± 0.36	83.98 ± 1.91
<i>Límite plástico</i>	<i>LP</i>	%	35.78 ± 2.19	37.31 ± 1.04
<i>Índice Plástico</i>	<i>IP</i>	%	41.47 ± 2.53	46.67 ± 1.53
<i>Contracción Volumétrica</i>	<i>CV</i>	%	13.54 ± 0.46	13.43 ± 2.37
<i>Contracción Lineal</i>	<i>CL</i>	%	23.83 ± 0.37	21.05 ± 0.21

El mismo efecto se ve presente en la contracción volumétrica, con un 13.43% respecto al 13.54% del suelo natural; y la contracción lineal con un valor de 21.05% respecto a los 23.83% del suelo natural, donde el suelo se contrae en valores por debajo de los obtenidos en el suelo natural. Sin embargo, ante tal modificación, su clasificación SUCS, de acuerdo con la carta de Casagrande, no se ve modificada.

La desviación estándar del límite plástico, el índice plástico y la contracción lineal, son menores en el suelo contaminado, indicando un comportamiento de menor

variación. Para el límite líquido y la contracción volumétrica, existe una mayor estabilidad y por ende un comportamiento más homogéneo de parámetros en el suelo natural.

IV.3.3.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

De los resultados presentados en la tabla 4.17 deducimos que el suelo tratado mediante biopilas es más rígido que el suelo en estado contaminado. El límite líquido en el suelo tratado mediante biopilas es de 90.80%, 6.82% mayor que 83.98% presentado en el suelo contaminado. El límite plástico se ve aumentado en un 4.54% en el suelo en atenuación natural, respecto al contaminando, por ende, el índice plástico se ve aumentado en un 2.58%. Ambos presentan una avrianza significativa con respecto al selo en estado contaminado.

La contracción volumétrica se ve aumentada de 13.43% a 20.44%, y la contracción lineal, de forma contraria, disminuye de 21.05% a 19.06%.

Estos comportamientos muestran una modificación que clasifica al suelo como un limo de alta compresibilidad. Una modificación en los límites de consistencia del suelo, indican un cambio en la interacción entre las partículas y el agua, indicando un aumentado de la cohesión del material.

Tabla 4.17. Límites de consistencia en los estados contaminado vs biopilas del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Biopilas</i>
<i>Límite líquido</i>	<i>LL</i>	%	83.98 ± 1.91	90.80 ± 2.43
<i>Límite plástico</i>	<i>LP</i>	%	37.31 ± 1.04	41.85 ± 8.34
<i>Índice Plástico</i>	<i>IP</i>	%	46.67 ± 1.53	49.25 ± 7.16
<i>Contracción Volumétrica</i>	<i>CV</i>	%	13.43 ± 2.37	20.44 ± 0.80
<i>Contracción Lineal</i>	<i>CL</i>	%	21.05 ± 0.21	19.06 ± 0.85

IV.3.3.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

El suelo en atenuación natural presenta un límite líquido de 90.57%, viéndose aumentado en un 6.59% con respecto al suelo en estado contaminado, así mismo, el límite plástico se ve también aumentado con un porcentaje de 46.67%, 9.36% arriba del 37.31% obtenido en el suelo contaminado. Como consecuencia, el rango de plasticidad del suelo es menor en el suelo tratado mediante atenuación natural respecto del suelo contaminado, y esto se comprueba en el índice de plasticidad, el cual es de 43.90%, 2.77% menor en el suelo tratado mediante atenuación natural respecto del suelo contaminado, de acuerdo con la tabla 4.18.

Tabla 4.18. Límites de consistencia en los estados contaminado vs atenuación natural del suelo.

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Suelo Contaminado</i>	<i>Atenuación Natural</i>
<i>Límite líquido</i>	<i>LL</i>	%	83.98 ± 1.91	90.57 ± 2.08
<i>Límite plástico</i>	<i>LP</i>	%	37.31 ± 1.04	46.67 ± 3.21
<i>Índice Plástico</i>	<i>IP</i>	%	46.67 ± 1.53	43.90 ± 2.08
<i>Contracción Volumétrica</i>	<i>CV</i>	%	13.43 ± 2.37	14.14 ± 0.75
<i>Contracción Lineal</i>	<i>CL</i>	%	21.05 ± 0.21	19.77 ± 0.55

La contracción volumétrica se ve aumentada en el suelo tratado mediante atenuación natural, con una desviación estándar de 0.75, sin embargo, considerando la desviación estándar el suelo contaminando igual a 2.37, podríamos deducir que no es un cambio significativo.

La contracción lineal se ve bastante disminuida en el suelo tratado mediante atenuación natural, el cual presenta un porcentaje del 19.77%, 1.28% menos que el 21.05% presentado en el suelo contaminado.

Se puede observar, que los límites de consistencia se ven modificados desde el estado natural, pasando por el estado contaminando y siendo remediados,

independientemente del método utilizado para el proceso. En cualquier caso, el suelo se vuelve menos maleable y esto se demuestra en la necesidad de un mayor contenido de agua para alcanzar los límites plástico y líquido del suelo. Como consecuencia, el suelo detendrá su cambio volumétrico a contenidos de agua mayores, como lo muestra la contracción volumétrica, parámetro que se ve aumentado en todos los casos. No así la contracción lineal, la cual se ve disminuida en cada etapa.

Esto generó también la modificación de la clasificación SUCS del suelo por granulometría, el cual paso de un suelo limo arcilloso de alta compresibilidad (*MH/CH*) a una arena bien graduada-limo de alta compresibilidad (*SW-MH*).

IV.4 Resistencia al esfuerzo cortante

IV.4.1 Suelo natural vs suelo contaminado

En la figura 4.4 se muestran los comportamientos esfuerzo-deformación de los ensayos de corte directo realizados en el suelo no contaminado y suelo contaminado, a esfuerzos confinantes de 25 kPa, 49 kPa y 98 kPa. Se aprecia una mayor resistencia al esfuerzo cortante (τ) y con deformaciones menores en los ensayos realizados en el suelo no contaminado, obteniendo valores de τ en un rango de 90 a 120 kPa, mientras que en el suelo contaminado el esfuerzo disminuye en un rango de 30 a 80 kPa.

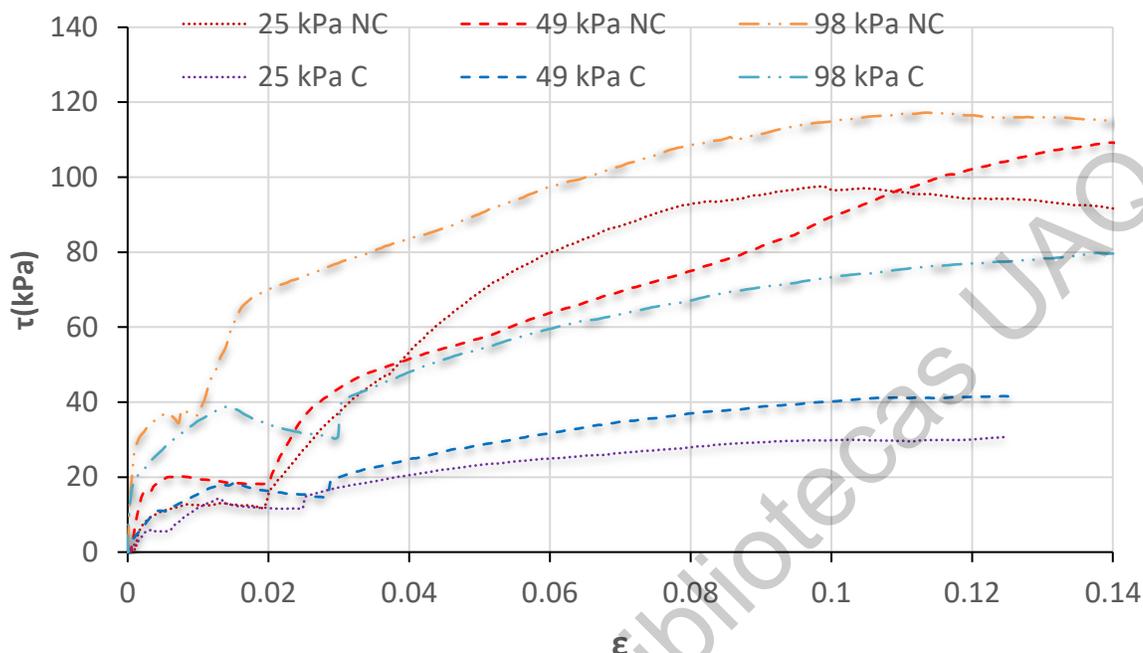


Figura 4.4. Gráfico deformación-esfuerzo cortante en el estado natural (NC) vs contaminado del suelo (C).

En la figura 4.5 se muestran las envolventes de falla de los ensayos de corte directo realizados en el suelo no contaminado y suelo contaminado, a esfuerzos confinantes de 25 kPa, 49 kPa y 98 kPa. Si bien el suelo no contaminado presenta una mayor resistencia al esfuerzo cortante, si se prolongan las envolventes de falla, se puede apreciar que el τ del suelo contaminado, tiene a aumentar con mayor rapidez a medida que se incrementa el esfuerzo confinante.

De forma coincidente con lo reportado por Rahman et al. (2010), Oyegbile y Ayinuola (2013), y contrario a Khosravi et al. (2013), la cohesión del suelo se ve disminuida en todos los estados con presencia de contaminante del suelo, y el ángulo de fricción se ve aumentado. Lo arrojado por las pruebas de corte directo, difiere en cuanto a lo observado en el ángulo de fricción con Safedian et al., (2008), pero coincide con el fenómeno observado en la cohesión del material. Safedian realizó un estudio en un suelo contaminado con el mismo contaminante.

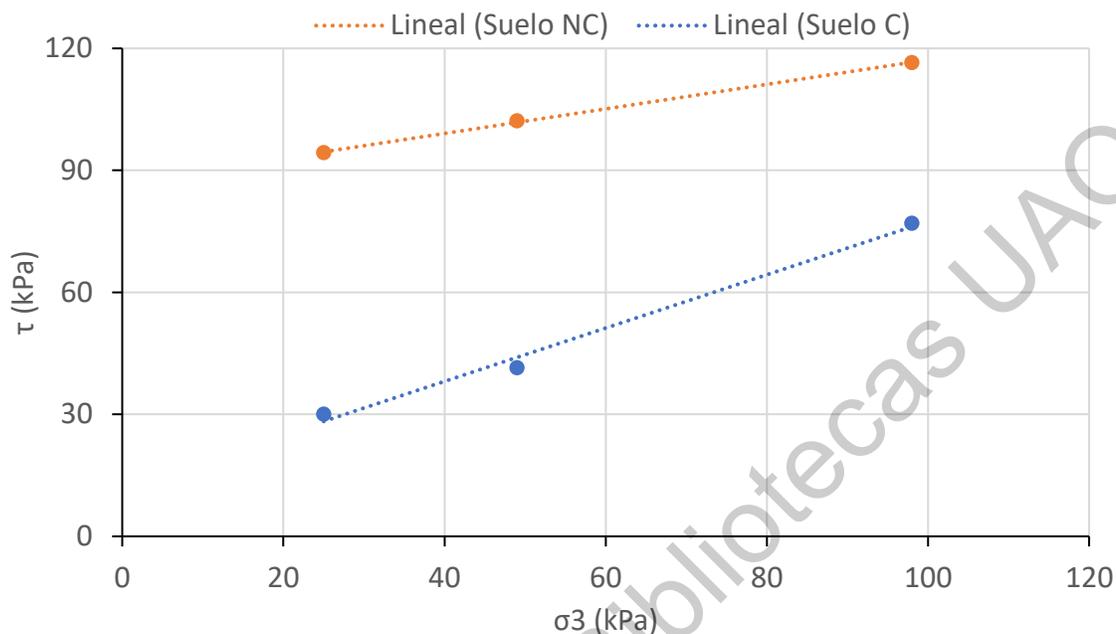


Figura 4.5. Envolvente de falla del suelo en el estado natural (NC) vs contaminado del suelo (C).

El suelo no contaminado presenta una cohesión de 87 kPa y hasta 1/7 del valor en el suelo contaminado, llegando a una cohesión de 11.90 kPa. Por el otro lado, el ángulo de fricción se ve aumentado de 16.80° a 33.29° , aumentando más del doble con respecto al suelo no contaminado, de acuerdo a la tabla 4.19. El suelo contaminado presenta un comportamiento granular, que se puede deber a la aglomeración de partículas debido a una mayor viscosidad en el contaminante presente del suelo, respecto con la viscosidad del agua. Lo que resulta en un comportamiento del contaminante similar al de un aglutinante o pegamento. Esto genera un comportamiento en el suelo, similar al de un suelo granular, presentando una mayor fricción interparticular.

Tabla 4.19. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo en el estado natural vs contaminado del suelo.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Natural	Suelo Contaminado
Cohesión	C	kPa	87.00	11.90
Ángulo de fricción	φ	°	16.80	33.25

IV.4.2 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante biopilas

Como se observa en la figura 4.6, el suelo tratado mediante biopilas reporta una mayor resistencia al esfuerzo cortante con respecto al estado contaminado del suelo y bajo los mismos esfuerzos de confinamiento.

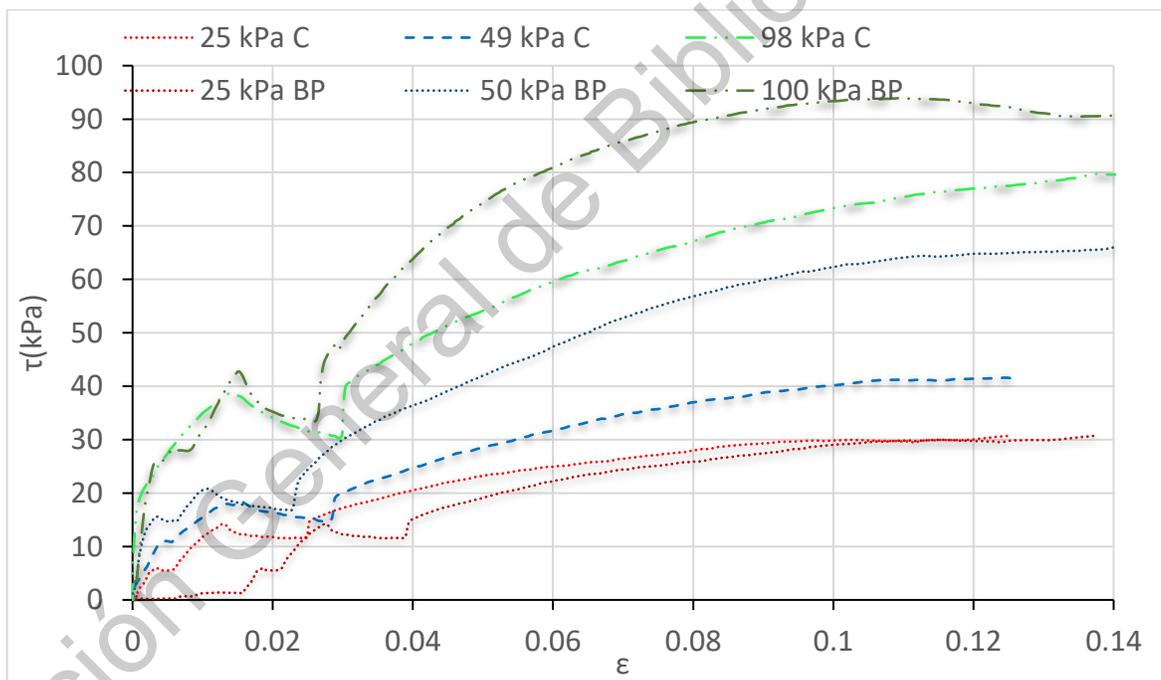


Figura 4.6. Gráfico deformación-esfuerzo cortante en el estado contaminado (C) vs biopilas del suelo (BP).

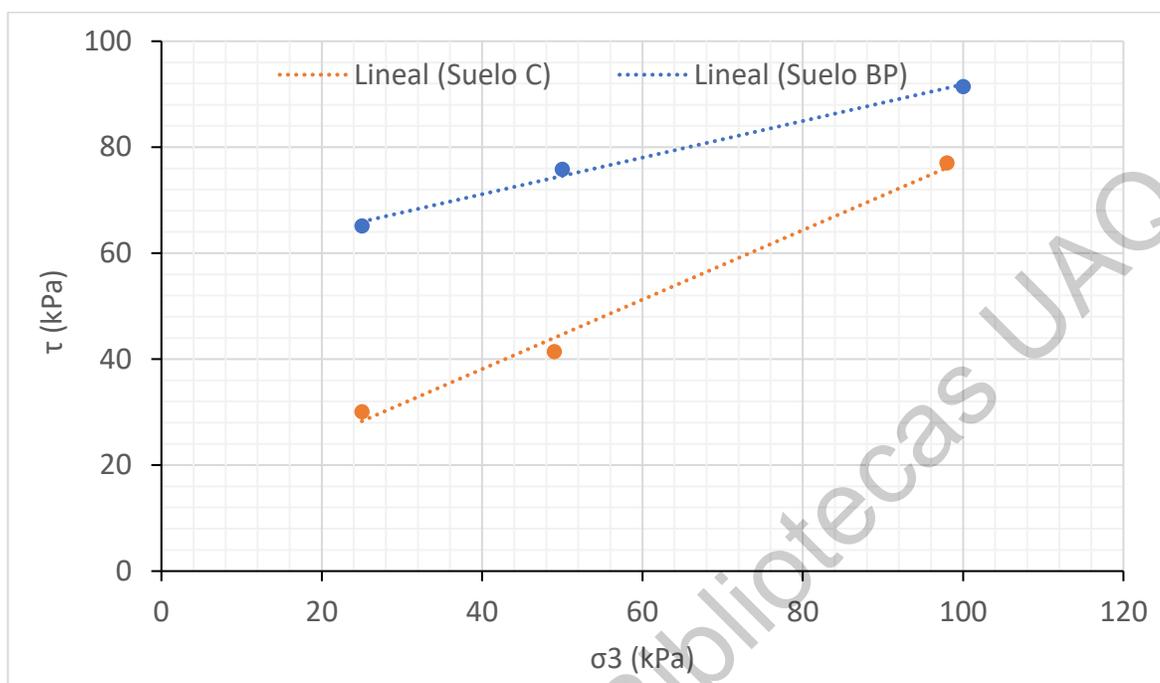


Figura 4.7. Gráfico esfuerzo confinante-efuerzo cortante en el estado contaminado (C) vs biopilas del suelo (BP).

Tabla 4.20. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo en el estado contaminado vs biopilas del suelo.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Contaminado	Biopilas
Cohesión	C	kPa	11.90	57.30
Ángulo de fricción	φ	°	33.29	19.06

De acuerdo con los valores presentados en la tabla 4.20, si bien el material tiene una mayor resistencia al esfuerzo cortante, la cohesión aumento de 11.90 kPa a 57.30 kPa, y el ángulo de fricción se vio reducido de 33.29° a 19.06°. Como se observa en la figura 4.7, el suelo tratado mediante biopilas genera una envolvente de falla con un menor ángulo de inclinación, lo que indica que a esfuerzos de confinamiento bajos, tendrá una mayor resistencia al esfuerzo cortante en comparativa con el suelo contaminado, sin embargo, al aumentarse los

confinamientos, el suelo contaminado presentará resistencias al esfuerzo cortante cercanas a los valores el suelo tratado mediante biopilas.

IV.4.3 Suelo contaminado vs suelo tratado mediante atenuación natural

El comportamiento del suelo en atenuación natural es similar al comportamiento del contaminado, con un aumento de rigidez en el suelo en atenuación natural y por ende una mayor resistencia al esfuerzo cortante como se observa en la figura 4.7.

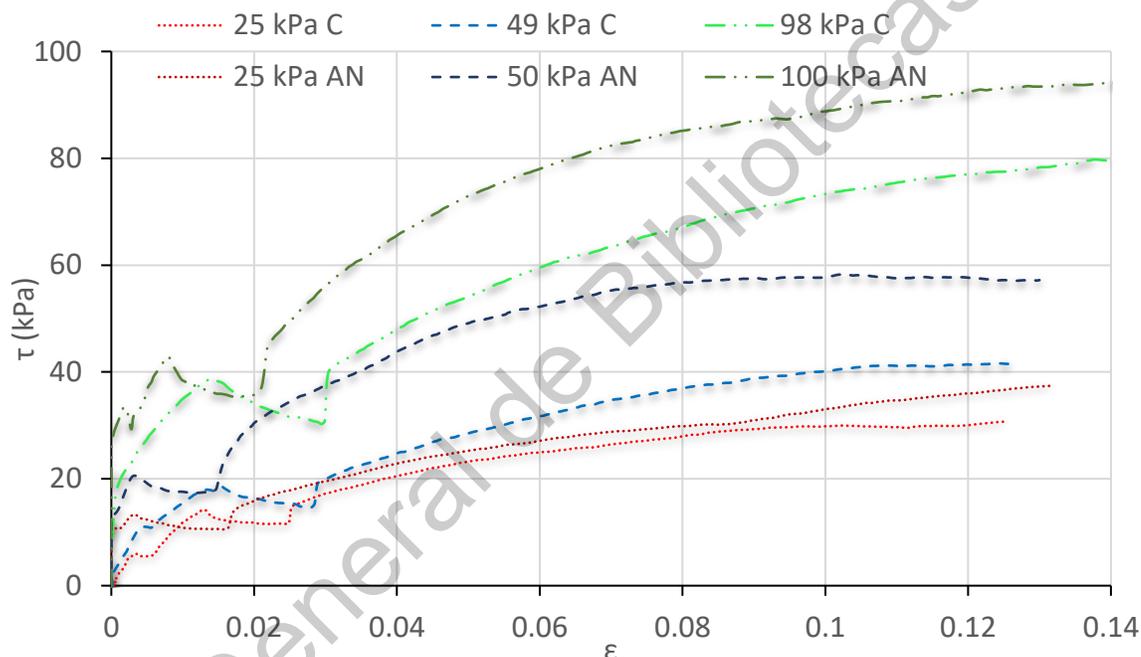


Figura 4.8. Gráfico deformación-esfuerzo cortante en el estado contaminado (C) vs atenuación natural del suelo (AN).

Tabla 4.21. Valores de cohesión y ángulo de fricción en ensayos de corte directo en el estado contaminado vs atenuación natural del suelo.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Suelo Contaminado	Atenuación Natural
Cohesión	C	kPa	11.90	18.52
Ángulo de fricción	φ	$^{\circ}$	33.29	36.73

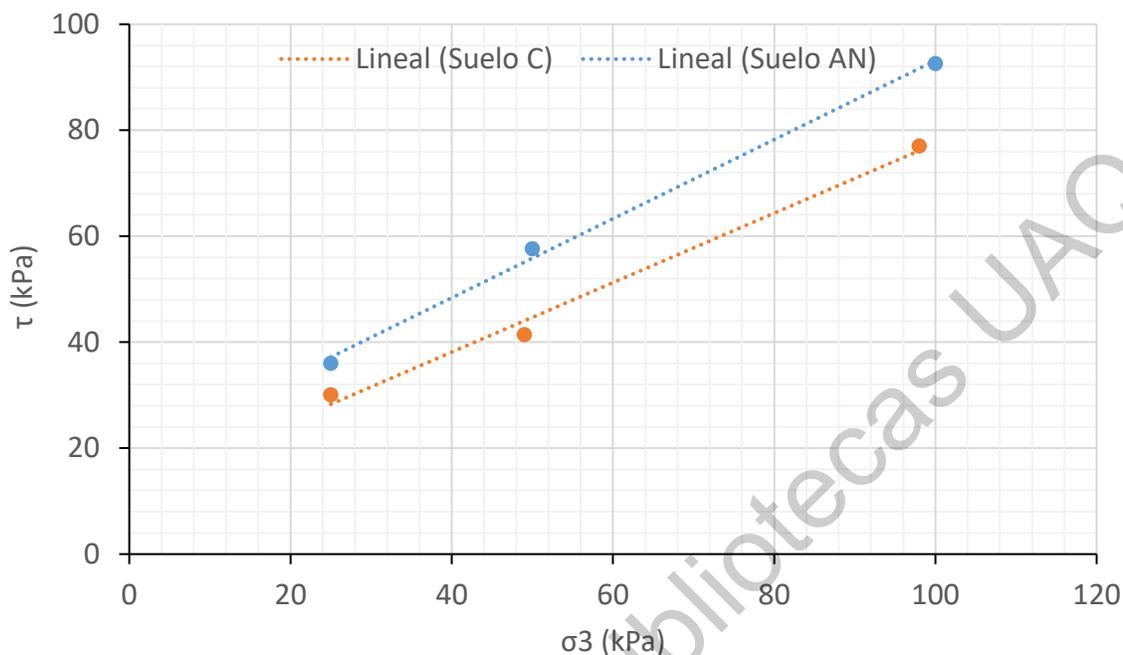


Figura 4.9. Envolvente de falla del suelo en el estado contaminado (C) vs atenuación natural del suelo (AN).

Las envolventes de falla observadas en la figura 4.8, para el suelo contaminado y el suelo en atenuación natural, muestran un comportamiento similar en ambos casos, indicando una mayor resistencia al esfuerzo cortante en el suelo en atenuación natural y, por ende, una mayor rigidez con respecto del suelo contaminado. Sin embargo, de acuerdo con la figura 4.9 y la tabla 4.21, al aumentar la resistencia, también se ve aumentada la cohesión de 11.90 kPa a 18.52 kPa y el ángulo de fricción de 33.29° a 36.73°. Simulando el comportamiento de un suelo granular con mayor presencia de suelo cohesivo respecto al suelo contaminado.

IV.5 Control de tratamientos

IV.5.1 Suelo tratado mediante biopilas

En el suelo tratado mediante biopilas, se propiciaron las condiciones necesarias de nutrientes en el suelo para la correcta reproducción de los microorganismos, generando una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo.

En la figura 4.15, se observa en color rojo la variación de la temperatura de la masa de suelo con el paso del tiempo, sin embargo, el rango de temperaturas en la muestra se mantuvo entre los 18 °C y 27 °C, siendo la temperatura promedio de 22.6 °C.

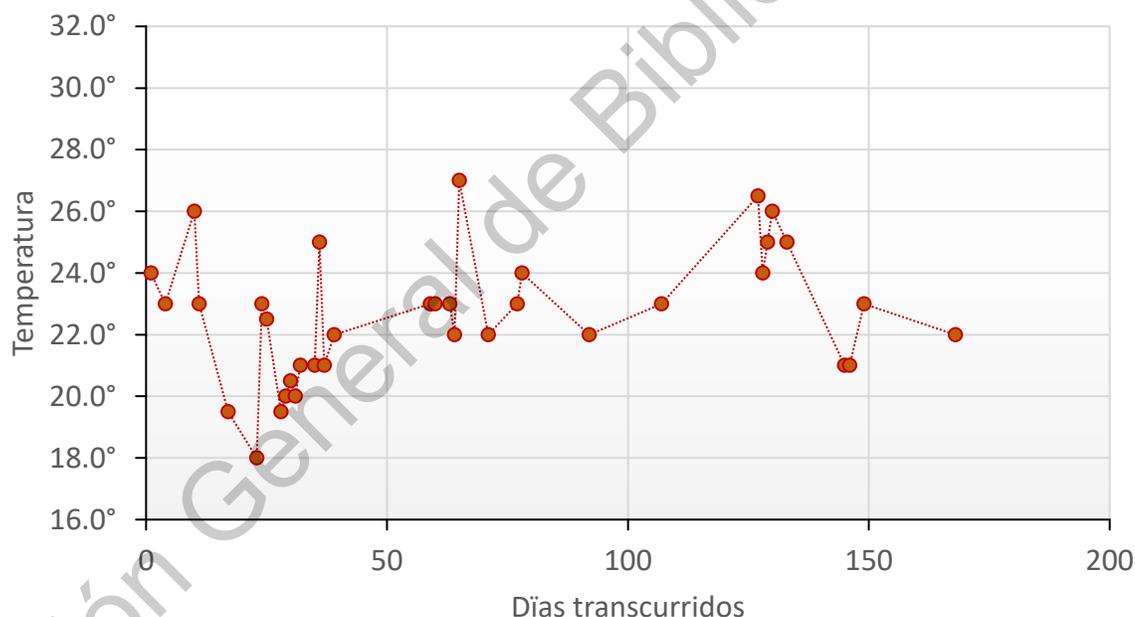


Figura 4.10. Comportamiento de la temperatura respecto al tiempo durante el tratamiento de biopilas.

De acuerdo a las temperaturas registradas durante el proceso del tratamiento, se determina que los microorganismos presentes en el suelo son del tipo mesófilos, debido a que la temperatura óptima de reproducción de este tipo de

microorganismos es de entre 25°C y 30°C, respectivamente los cuales se agrupan como mesófilos

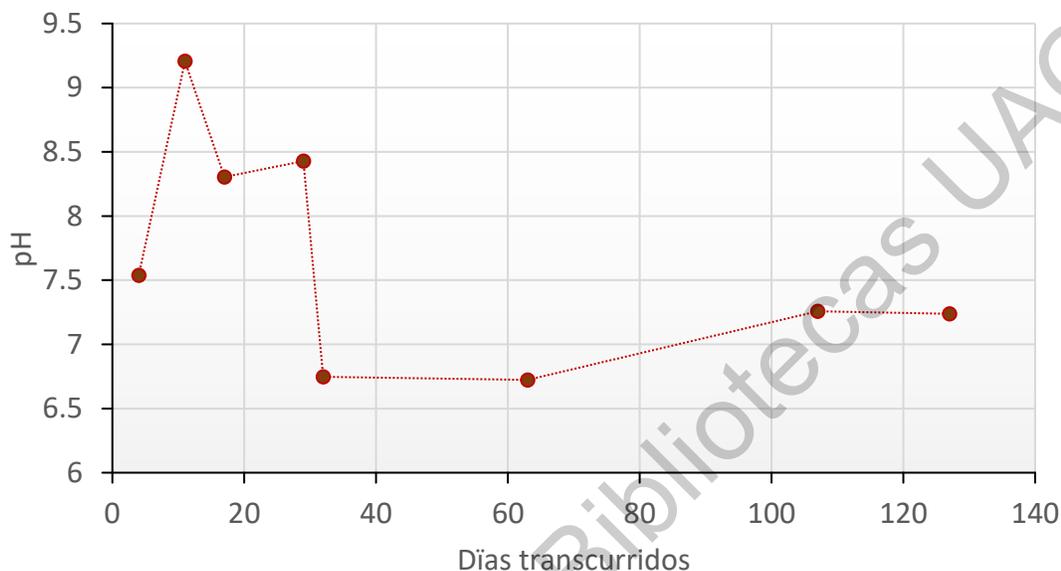


Figura 4.11. Comportamiento del pH respecto al tiempo en el tratamiento de biopilas.

El pH del suelo en tratamiento, se acidifica debido a la adición del contaminante y pasados los primeros 32 días, tiene a neutralizarse, manteniéndose en un rango de entre 6.7 y 7.3. Como consecuencia de la adición de nutrientes, el suelo tiene una mayor disponibilidad de estos mismos y por ende se neutraliza el pH, dando paso a un ambiente óptimo para el crecimiento de otro tipo de microorganismos, respecto al tratamiento de atenuación natural, que depuren los hidrocarburos del suelo.

IV.5.2 Suelo tratado mediante atenuación natural

Durante la aplicación del tratamiento de la atenuación natural, se llevó un registro de la temperatura del suelo respecto al tiempo de tratamiento. En la figura 4.12 se puede observar dicho registro.

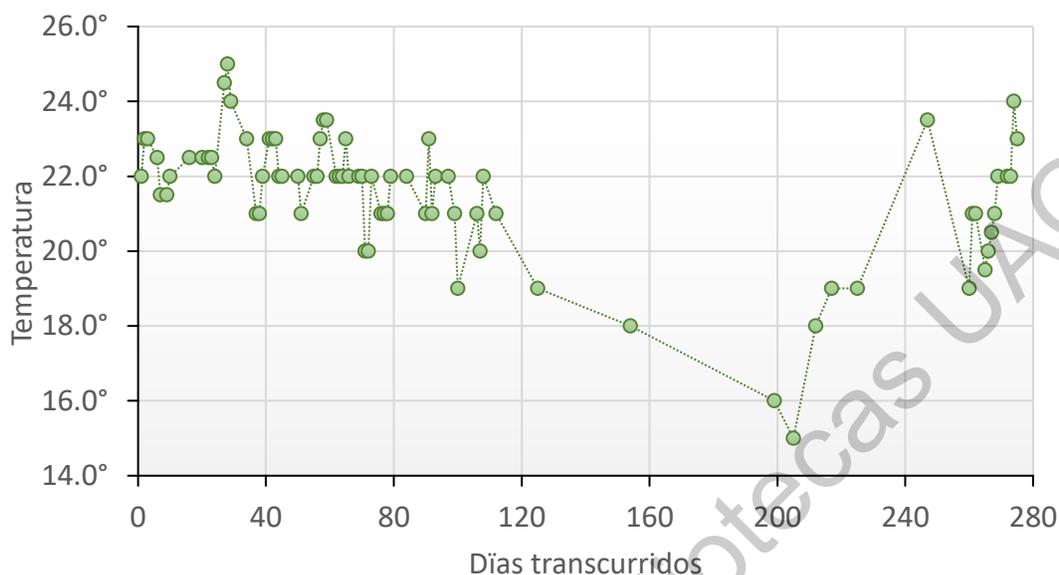


Figura 4.12. Comportamiento de la temperatura respecto al tiempo durante el tratamiento de atenuación natural.

De la figura anterior se puede resaltar que la temperatura del sistema osciló entre 19 °C y 25 °C, con unos picos en los días 200 que coincide con las temporadas invernales del clima, registrando un comportamiento homogéneo de la temperatura. De acuerdo a las temperaturas registradas, se observa que los microorganismos presentes en el suelo son del tipo psicrófilos y psicrotrofos, debido a que la temperatura óptima de reproducción de este tipo de microorganismos es de entre 12 °C y 15 °C, y entre 25 °C y 30 °C, respectivamente (Pererira *et al.*, 2011). Sucede que dentro de este rango de temperatura es posible que se encuentren presentes bacterias del filo de las proteobacterias, dentro de las cuales están las *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Acinetobacter*, *etc* Tortora *et al.*, 2007). Este tipo de bacterias puede resistir a diferentes condiciones ambientales (y sus variaciones), además de que pueden emplear diferentes tipos de sustratos. En algunos estudios se ha reportado la presencia de bacterias hidrocarburoclásticas del género *Pseudomonas*, por lo que cabe la posibilidad de que este tipo de bacterias hayan estado presentes en el suelo (Pererira *et al.*, 2011).

En la figura 4.13 se observa el comportamiento de los pH registrados en el suelo durante la etapa de tratamiento de atenuación natural. La muestra de suelo presentó un pH de 6.9 al inicio del tratamiento, y de 6.7 al término, por lo que el pH se mantiene en un nivel ácido. Se observa una disminución del pH en 5.8, lo cual se puede deber a una disminución en la actividad microbiana del suelo como consecuencia de un descenso en la temperatura. Se puede deducir que las bacterias implícitas en el tratamiento de biorremediación, presentes en el suelo durante el proceso, son del tipo neutrófilas.

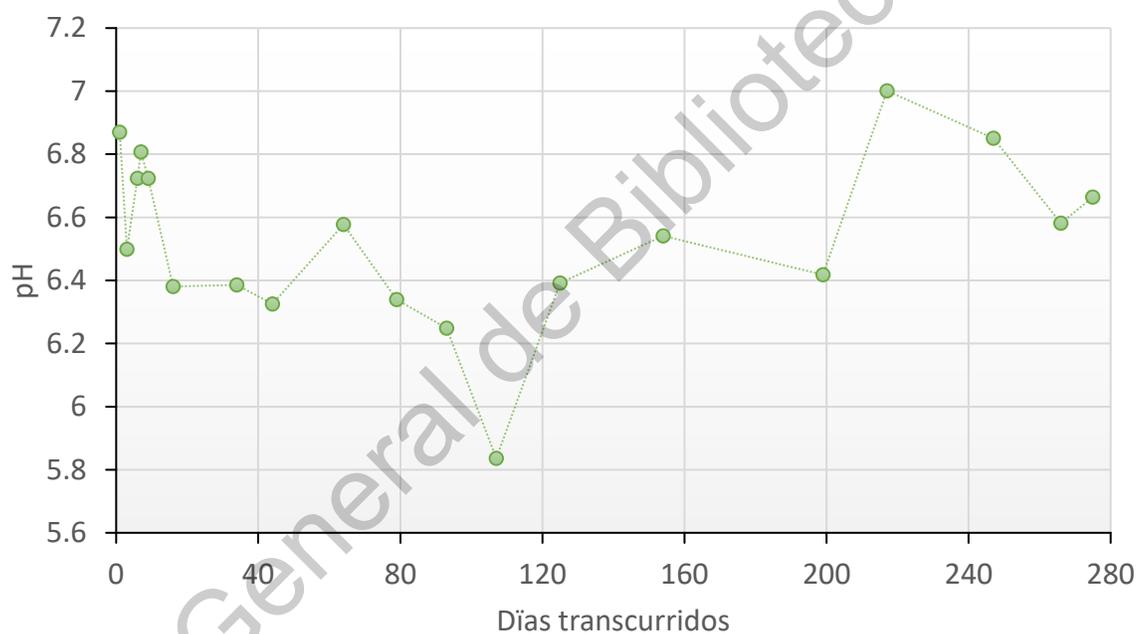


Figura 4.13. Comportamiento del pH respecto al tiempo en el tratamiento de atenuación natural.

IV.6 Curva de calibración para determinación de contenido de contaminantes

La siguiente gráfica (figura 4.14) relaciona el porcentaje de pérdidas en horno a 110°C, de un suelo contaminado a diferentes porcentajes de peso seco, en un rango de contenido inicial de humedad de 0% a 30%.

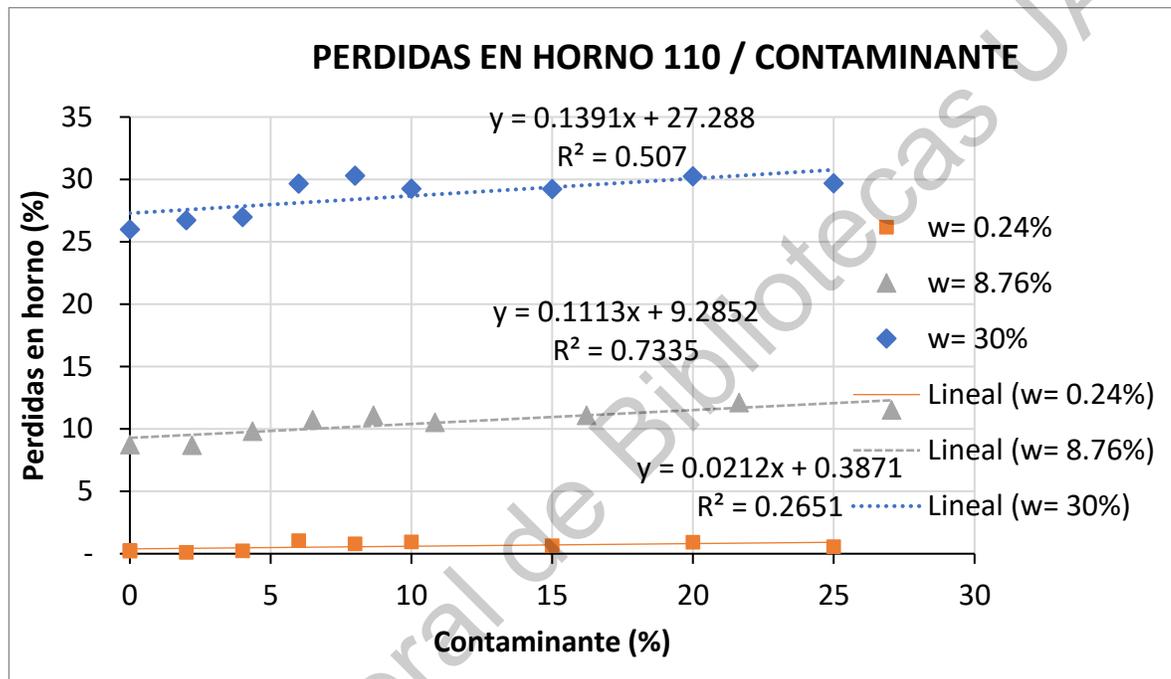


Figura 4.14. Pérdidas por secado en horno a 110° C.

Como se puede observar, existe un coeficiente que relaciona las pérdidas a 110 °C en el rango manejado. Este coeficiente se presenta en la figura 4.15.

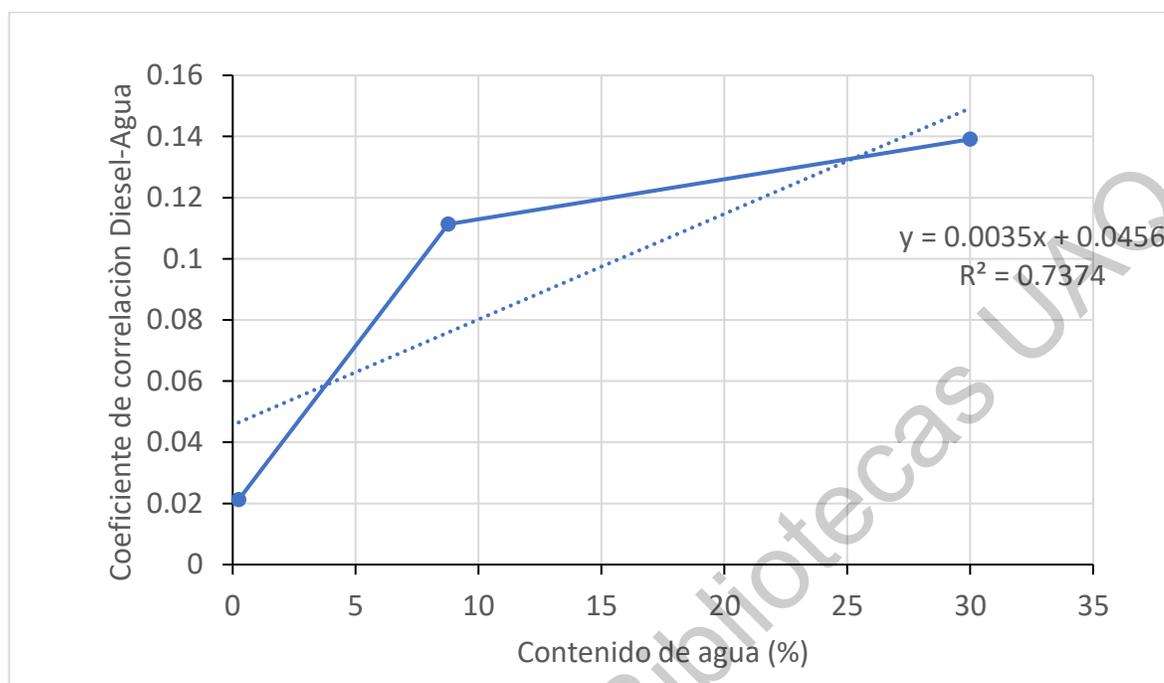


Figura 4.15. Coeficiente de contenido de agua para pérdidas a 110°C.

La figura 4.16, muestra la relación de las pérdidas de líquidos de suelo contaminado y secado a una temperatura de 165°C. Se puede observar una correlación cercana a uno en esta gráfica. De la misma manera que a 100 °C, en la figura 4.17, se muestra la correlación de un coeficiente de contenido de agua para el rango dando.

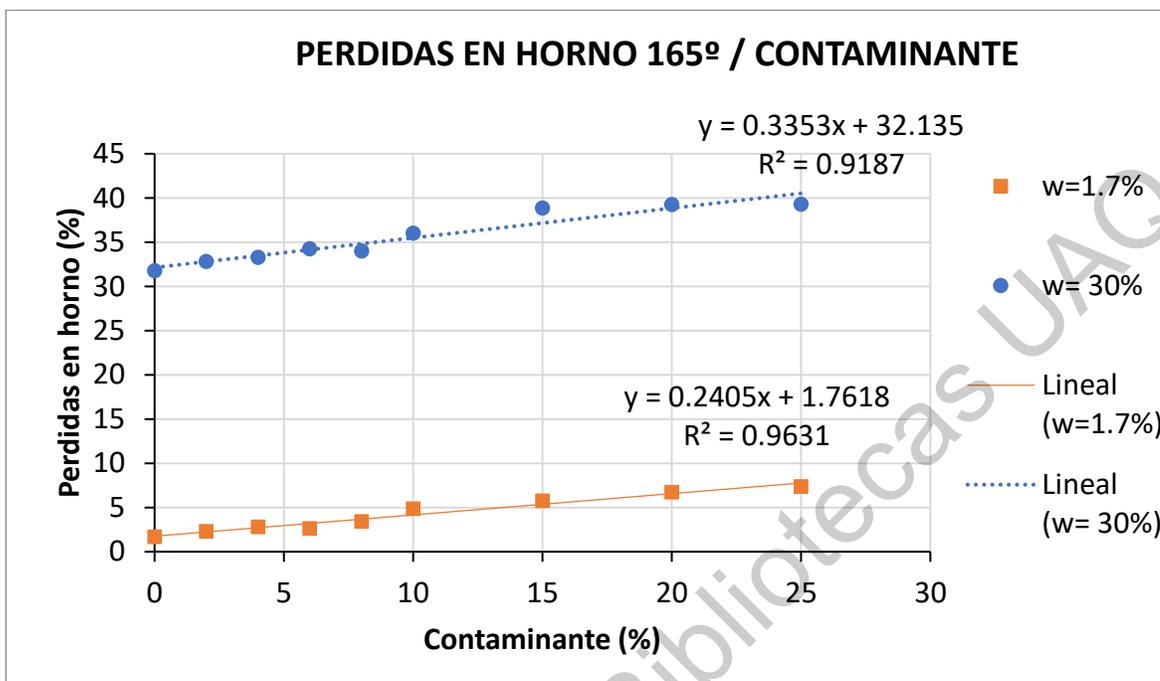


Figura 4.16. Perdidas por secado en horno a 165° C.

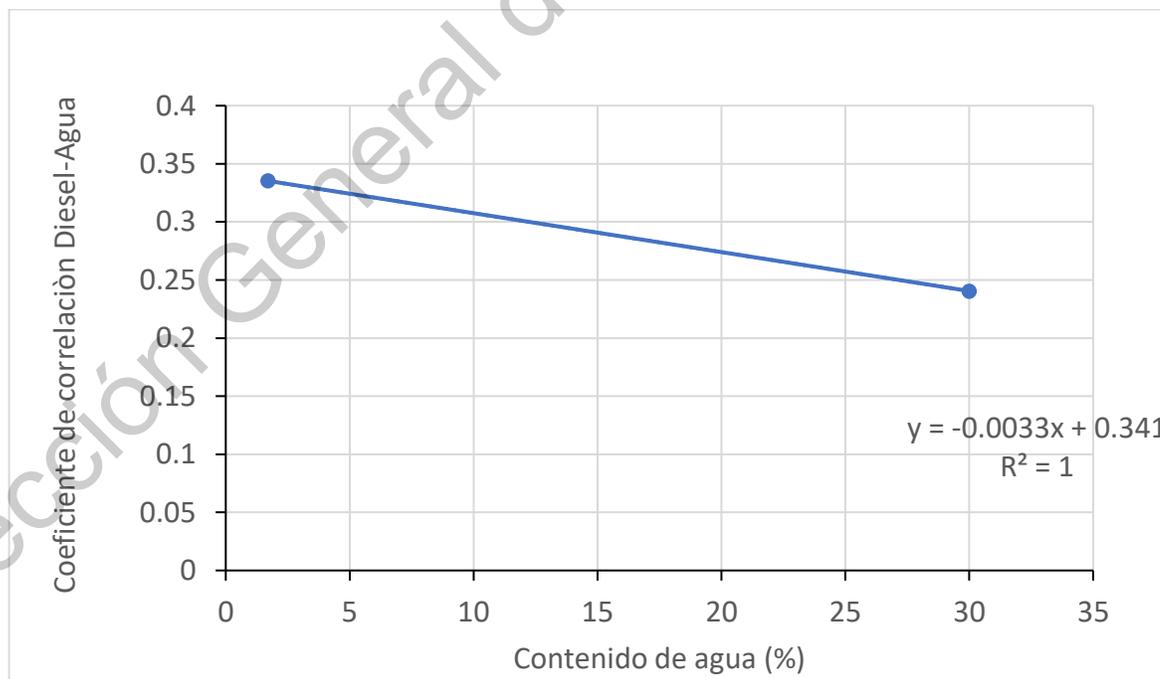


Figura 4.17. Coeficiente de contenido de agua para pérdidas a 110°C.

Finalmente, la figura 4.18 muestra la relación existente entre las pérdidas de líquidos a las diferentes temperaturas y contenidos de contaminante con una correlación cercana a uno en todos los casos. Método propuesto para determinar los contenidos de contaminante del material durante los procesos de remediación.

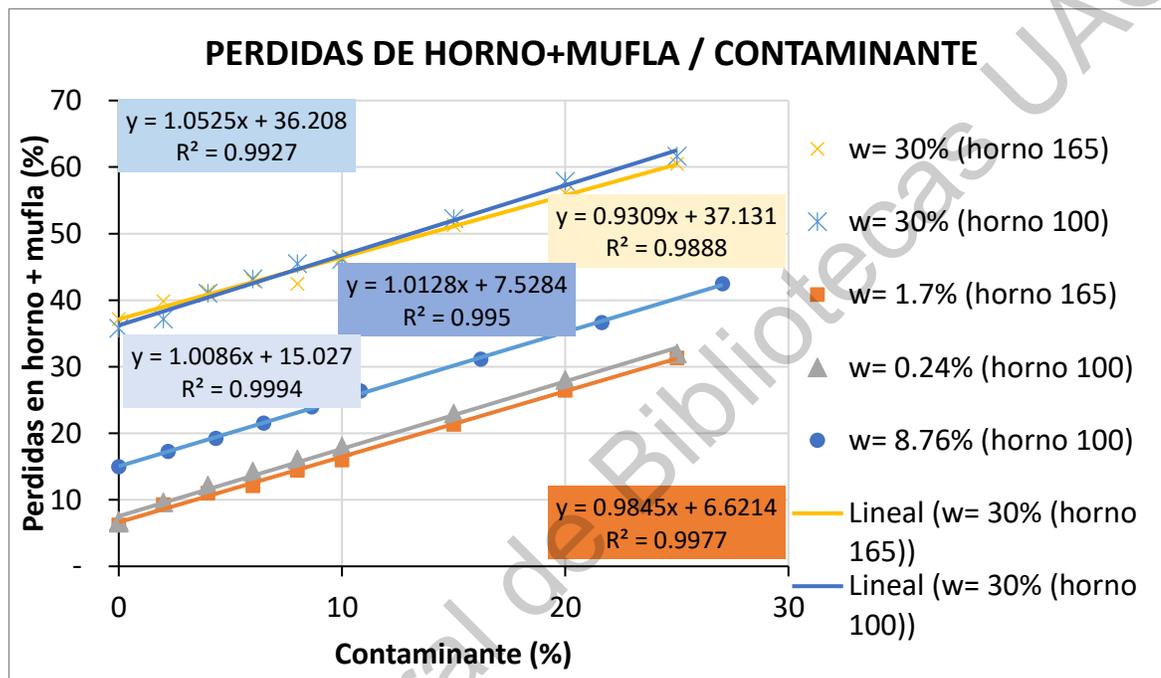


Figura 4.18. Pérdidas por secado en horno + mufla.

Con las gráficas mostradas, se generó un sistema de ecuaciones que relaciona cada etapa del procedimiento propuesto, sin embargo, los resultados obtenidos indicaban presencias de contaminante negativas, o mayores a las añadidas al material en un proceso inicial, es decir, resultados incongruentes.

IV.6.1 Contenido de contaminantes de suelo tratado mediante biopilas

La figura 4.19 muestra la relación existente entre las pérdidas de agua del material durante el proceso de biopilas. Se puede observar que, al paso del tiempo, el suelo maneja un mayor contenido de agua, esta pudo haber sido absorbida del ambiente

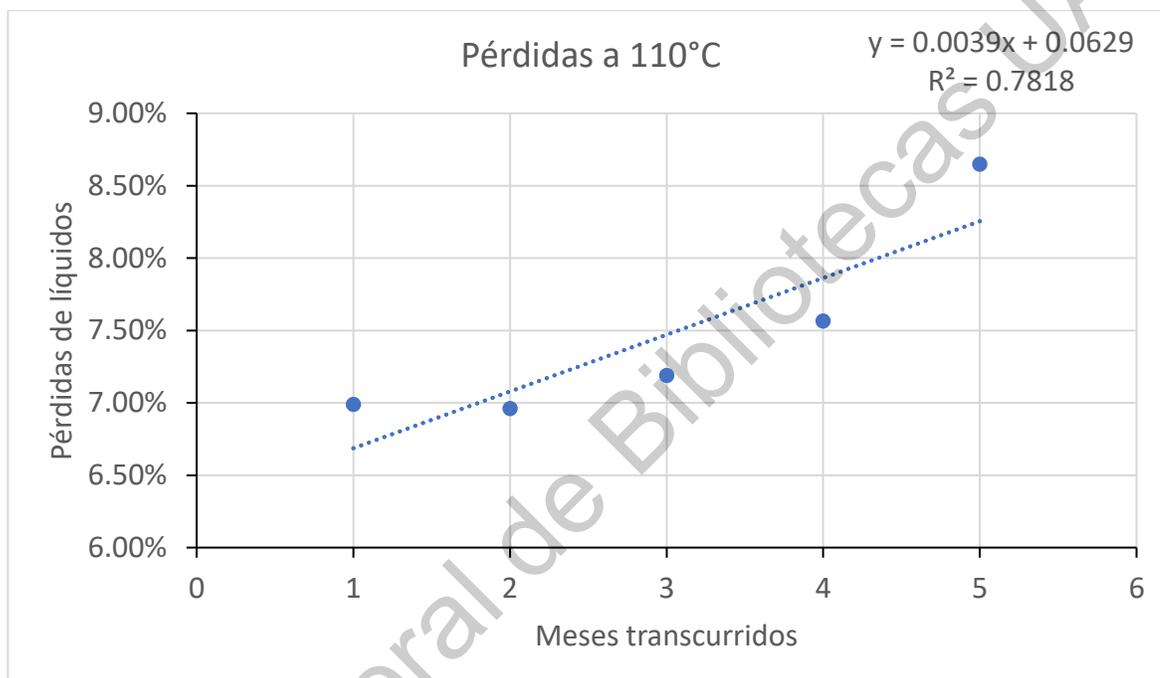


Figura 4.19. Pérdidas por secado en horno a 110 °C.

En la figura 4.20, se puede observar que, a mayor paso del tiempo, al secar el material a 165 °C, también se genera una mayor pérdida de líquidos. A simple vista, estos resultados podrían indicar un aumento en el contenido de contaminante, sin embargo, esto es falso, debido a que no se le añadió mayor cantidad de contaminante durante el proceso al suelo. Si observamos la figura 4.21, podemos observar que el contenido de materia orgánica también se ve aumentado, hecho que podría justificarse como un contenido de contaminante más un porcentaje de materia orgánica aumentada como consecuencia del proceso de remediación.

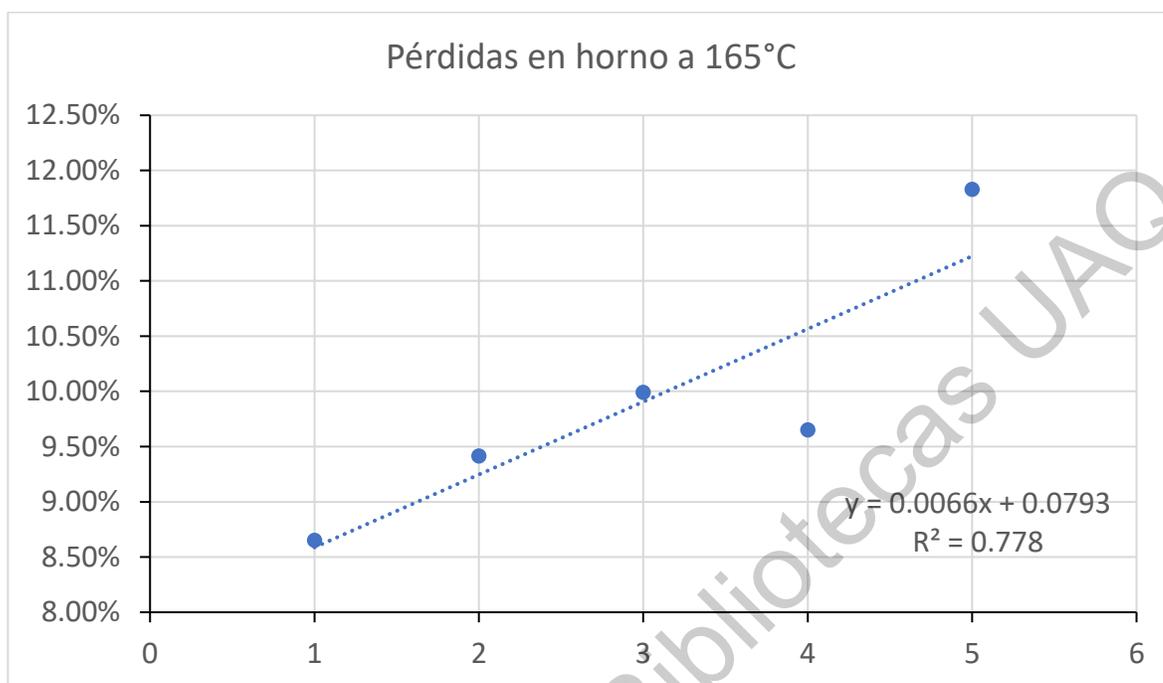


Figura 4.20. Pérdidas por secado en horno a 165°C.

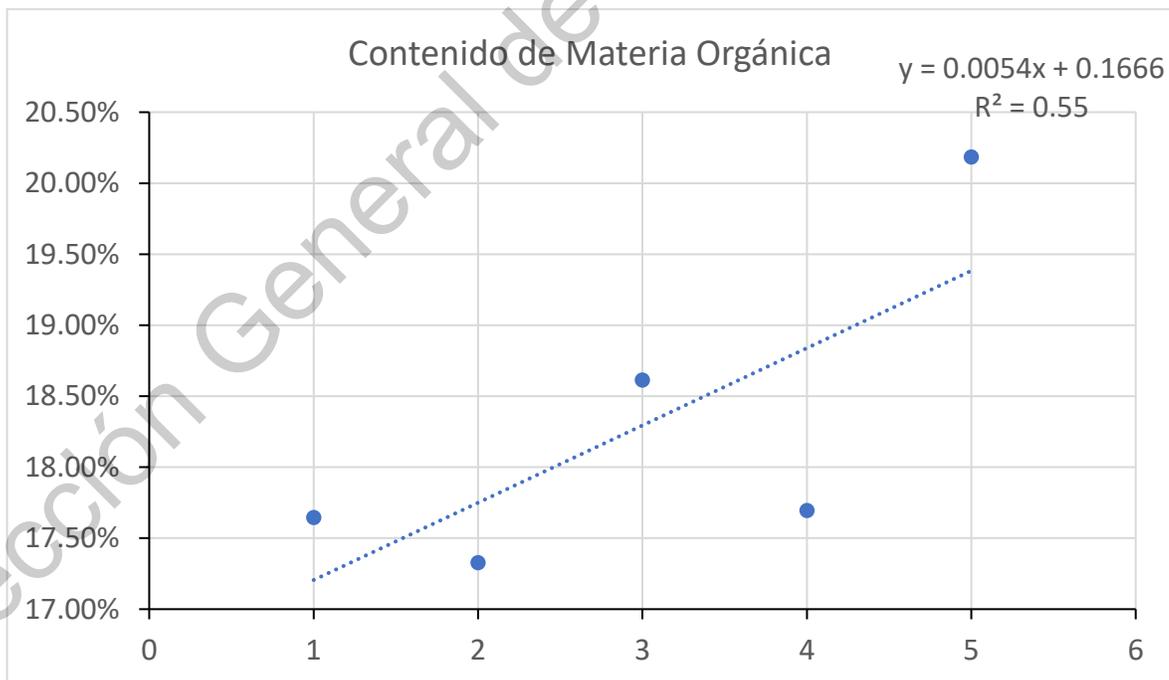


Figura 4.21. Contenido de materia orgánica.

IV.6.2 Contenido de contaminantes de suelo tratado mediante atenuación natural

En la figura 4.22 se puede observar que, a mayor paso de los meses, se genera una pérdida en el contenido de agua, esto se puede generar como consecuencia del agua absorbida de ambiente, sin embargo, el rango de variación es de aproximadamente 2%.

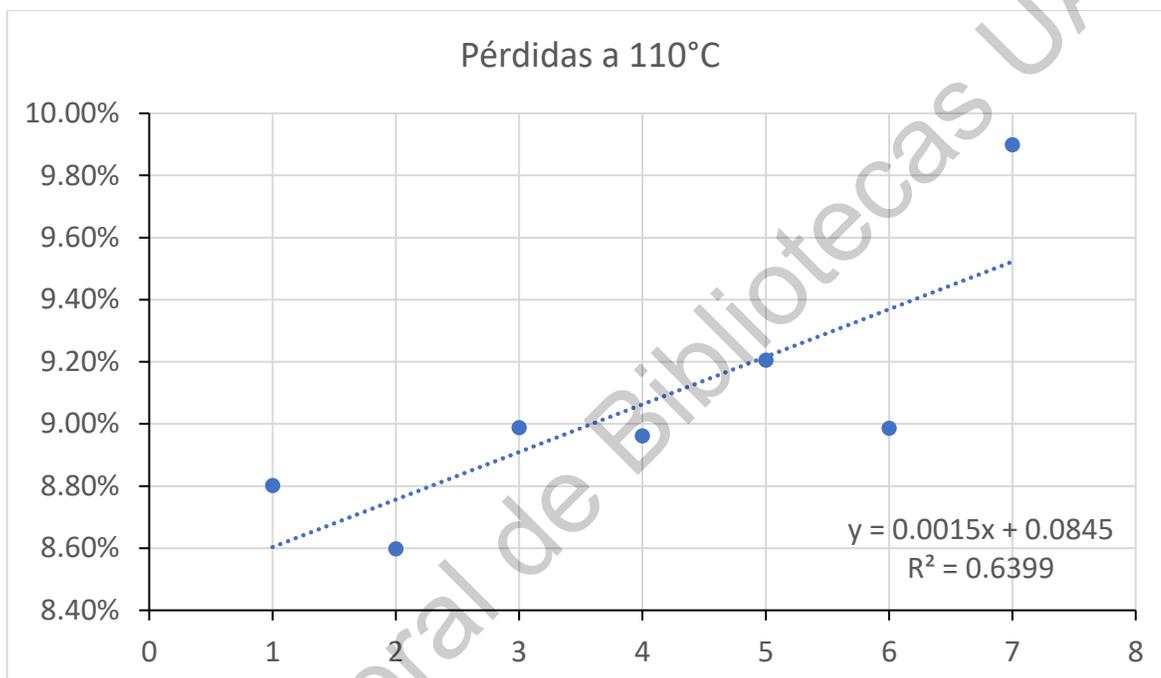


Figura 4.22. Pérdidas por secado a 110 °C.

En la figura 4.23, podemos observar que a medida que transcurre el tiempo, existe un mayor contenido de materia orgánica, esto podría justificarse debido al aumento de los microorganismos presentes en el suelo como consecuencia del proceso de remediación.

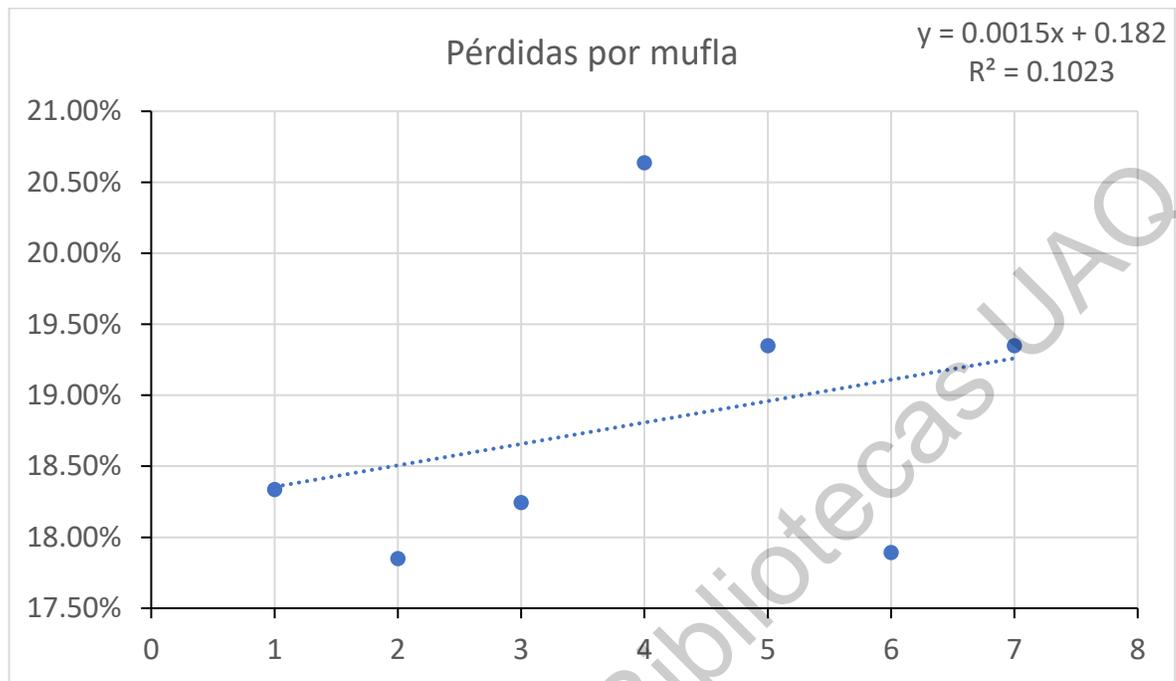


Figura 4.23. Contenido de materia orgánica.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES

Dirección General de Bibliotecas UAQ

5. Conclusiones

La hipótesis planteada para el tema de investigación se cumplió parcialmente, puesto que si bien las propiedades geotécnicas del suelo tratado mediante atenuación natural y biopilas se ven modificadas con respecto a su condición en estado contaminado, no todas tienden a aumentar para la mejora del suelo, por ejemplo en el suelo contaminado tratado por atenuación natural el ángulo de fricción se ve aumentado y para el suelo tratado por biopila el cambio se ve en la granulometría donde de una SW cambia a un MH; algunas otras propiedades no presentan un cambio favorable.

Al término de la investigación, se compararon las propiedades geotécnicas y químicas del suelo contaminado respecto del suelo en estado natural, y del suelo tratado mediante los métodos de biopilas y atenuación natural respecto del estado contaminado del suelo y se obtuvieron los siguientes análisis.

La clasificación del suelo no contaminado (MH-CH) se mantiene constante en el suelo contaminado y en el suelo tratado mediante atenuación natural, sin embargo, el suelo tratado mediante biopilas presenta una caracterización distinta (SW-MH), dejando de lado las arcillas.

Las propiedades geotécnicas del suelo contaminado se ven modificadas con respecto al suelo en estado no contaminado, esto por la presencia del diésel, el cual conglo mer a las partículas de arcilla, generando una apariencia de aumento en el porcentaje de limos y el proceso de oxidación que provoca la reducción del porcentaje de arenas. Como consecuencia de la característica de combustible fósil, al ser añadido al suelo, el suelo aumenta considerablemente su contenido de materia orgánica y así mismo, acidifica el pH del suelo. La gravedad específica del suelo se reporta como disminuida, sin embargo, el cambio en su S_s se debe a la sustitución de una cantidad de agua por el diésel presente en la matriz de sólidos al momento de la ejecución de la prueba.

El suelo tratado mediante biopilas respecto al suelo en estado contaminado, presenta un comportamiento y una granulometría granular, distinta a la mostrada en el suelo contaminado. Esto como consecuencia de los residuos de contaminante así mismo, debido a la presencia de exopolímeros bacterianos que funcionan como conglomerante de las partículas finas. El pH del suelo se mantiene fluctuante al inicio del tratamiento como consecuencia de la actividad microbiana presente en el suelo, pero se estabiliza y se mantiene neutral.

Las propiedades geotécnicas del suelo sometido a atenuación natural durante 9 meses se ven sin modificaciones considerables con respecto al suelo contaminado. La cinética química del suelo tiende a estabilizarse, disminuyendo la fluctuación del pH del suelo. Como consecuencia de la característica biológica del diésel al ser un combustible fósil, el contenido de materia orgánica del suelo se puede ver aumentado en consecuencia a la absorción del diésel en los microorganismos presentes en el suelo. La resistencia al esfuerzo cortante tiene una tendencia similar en el suelo en atenuación natural y el suelo contaminado, reportando parámetros de resistencia mayores el suelo en atenuación natural. El suelo presenta una mayor rigidez, por lo que el ángulo de fricción se ve disminuido por casi 1.0° en el suelo en atenuación natural, y la cohesión se ve casi aumentada por 3kPa respecto de suelo contaminado. Esta rigidez se ve reflejada también en el aumento de los límites de consistencia, por el tiempo de exposición del contaminante en el suelo.

La capacidad de intercambio catiónico del suelo contaminado, el suelo tratado mediante atenuación natural y mediante biopilas, no presentan una relación homogénea entre la modificación de este y el pH, como lo mencionan algunos autores. Solo podemos observar que el CIC del suelo tratado mediante biopilas no presenta una modificación significativa la reducir su valor a 36.16 Cmol/kg. Por otro lado, el CIC del suelo tratado mediante atenuación natural se ve reducido de 38.41 Cmol/kg en el estado contaminado, a 14.57 Cmol/kg al detener el proceso

En cuanto al contenido de contaminantes del suelo y la remoción de los tratamientos de remediación, no fue posible usar los métodos de extracción químicos, y el método propuesto mediante el uso de la mufla no permite determinar el contenido de contaminantes. Sin embargo, se puede observar que a medida que avanza el tiempo de la remediación el contenido de materia orgánica aumenta, lo que puede traducirse en un aumento de microorganismo por degradación del diésel.

Fue necesario proponer modificaciones en las metodologías estandarizadas en la determinación de las propiedades geotécnicas, debido que la normativa actualizada no considera las pruebas con presencia de contaminante, por lo que es necesario proponer una actualización a las metodologías estandarizadas donde se permita la calibración de las pruebas ante la presencia de diésel y con el uso de agua destilada justo como lo mencionan las normativas requeridas; así mismo, realizar una calibración que permita analizar suelo con diversos porcentajes de contenido de diésel, y determinar el porcentaje real de contaminante presente en el suelo.

Alarcón, A., y Ferrera-Cerrato, R. (2013). Biorremediación de suelos y aguas contaminadas con compuestos orgánicos e inorgánicos. México: Trillas.

Anza, H., Orantes, P., González, R., Ruiz, A., Espinoza, E., Martínez, R., Vera, P. (2016). Biorremediación de suelos contaminados con aceite automotriz usados mediante sistema de biopilas. Espacio I+D, Innovación Más Desarrollo, 5(12), 50–77.

Arrieta, O., Rivera, A., Rojano, B., Ruiz, O., Correa, M., Cienfuegos, A., y Cardona, S. (2012). Caracterización fenotípica y molecular de poblaciones bacterianas aisladas en un suelo contaminado con diésel y sometido a dos tecnologías de biorremediación. Revista Gestión y Ambiente, 15(3), 65–76.

ASTM Standard C837 - 09. (2014). Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. ASTM Int. 1–2.

ASTM Standard D2216. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM Int. 1–7.

ASTM Standard D2487. (2014). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Int. 1–12.

ASTM Standard D2974. (2014). Standard Practice for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. ASTM Int. 1-4.

ASTM Standard D3080/D3080M. (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM Int. 1-9.

ASTM Standard D422 - 63 e2. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis. ASTM Int. 1-8.

ASTM Standard D427 (2004). Standard Test Methods for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method. ASTM Int. 1–4.

ASTM Standard D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM Int. 1–20.

ASTM Standard D4972. (2013). Standard Test Method for pH of Soils. ASTM Int. 1-4.

ASTM Standard D5084. (2016). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM int 1-26.

ASTM Standard D6913-D6913M. (2017). Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM Int. 1-34.

ASTM Standard D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM Int. 1–8.

Azuela, A., Carabias, J., Provencio, E. and Quadri, G. (1993). Desarrollo sustentable. Hacia una política ambiental, Ed.UNAM, Coord de humanidades.

British Standard 1377. (1990) Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 2: Classification tests. BS Int. 5-8.

Corona-Ramírez, L., y Iturbe-Argüelles, R. (2005). Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos, 2, 119–126.

Couto, H. J. B., Massarani, G., Biscaia, E. C., y Sant'Anna, G. L. (2009). Remediation of sandy soils using surfactant solutions and foams. Journal of Hazardous Materials, 164, 1325–1334.

Das, Braja M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica. 4ta Edición. Cengage Learning. Pp 636.

Decesaro, A., Rampel, A., Strieder Machado, T., Thomé, A., Reddy, K., Claudia Margarites, A., Colla, L. M. (2016). Bioremediation of soil contaminated with diesel and biodiesel fuel using biostimulation with microalgae biomass. Journal of Environmental Engineering, 1–8.

FAO (2019). Levantamiento, propiedades químicas del suelo. Portal de la FAO. Fecha de consulta 30-septiembre-2019.

Gallo, A., Peñuela, G., Pino Rodríguez, N., y Carvajal, S. (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diésel. *Producción Más Limpia*, 7(1), 101–108.

Garzón, J. M., Rodríguez Miranda, J. P., y Hernández Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad Y Salud*, 19(2), 309. Disponible en: <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Gelati, P., Lozano, L., Sarli, G., Filgueira, R. y Soracco Carlos. (2009). Influencia de la materia orgánica en la superficie específica de un Argiudol típico. *Rev. FCA UNCuyo*. XLI (2). 117-126.

Geotecnia 2000. (2000). Remediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante biopilas: Caso práctico. En ponencia (pp. 1–92). Disponible en: <http://www.geotecnia2000.com/files/archivos/Ponencia - Suelos Contaminados.pdf>

Gómez, W., Gaviria, J., y Cardona, S. (2009). Evaluación de la bioestimulación frente a la atenuación natural y la bioaumentación en un suelo contaminado con una mezcla de gasolina Diesel. *Dyna - Issn 0012-7353*.

Gupta, A., Joia, J., Sood, A., Sood, R., Sidhu, C., y Kaur, G. (2016). Microbes as Potential Tool for Remediation of Heavy Metals: A Review. *Journal of Microbial y Biochemical Technology*, 8(4), 364–372. Disponible en: <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000310>.

Ijimdiya, T. S. (2013). The Effects of Oil Contamination on the Consolidation Properties of Lateritic Soil. *Development and Applications of Oceanic Engineering (DAOE)*, 2(2), 53–59.

INECC. (2018). Industria petrolera. Importancia del petróleo. Disponible en: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/16/parte3_13.html#top. Fecha de consulta 15-Agosto-2018.

INEGI. (2014). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Querétaro, Querétaro.

INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Querétaro. México.

Izdebska-Mucha, D., y Trzciński, J. (2008). Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *Geologija*, 50, 68–74.

Jiménez, B. E. (2008). La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. México, DF: Editorial Limusa.

Juárez Badillo, E., y Rico Rodríguez, A. (2014). Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos. Editorial Grupo Noriega. México.

Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., y Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11–16.

Martínez, V. E., y López, F. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra Latinoamericana*, 19, 9–17.

Martínez, A., Pérez, M. E., Pinto, J., Gurrola, B., y Osorio, A. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), 241–252.

Meza A. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la catedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Medellín, Colombia, Vol. 31: 23-28.

Muskus Morales, A. M., Santoyo Muñoz, C., y Plata Quintero, L. S. (2013). Evaluación de las técnicas de atenuación natural, bioventing, bioaumentación y

bioaumentación-bioventing para la biodegradación de diésel en un suelo arenoso, en experimentos en columna. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 83–94.

Narváez-Flores, S., Gómez, M. y Martínez, M. (2008). Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aislados a partir de sedimentos del caribe colombiano. *Boletín de investigación marina y costera*.37 (1). 61-75.

Oficina de Innovaciones tecnológicas. (1996). *Guía del ciudadano : Atenuación natural*. United States Environmental Protection Agency, 1–4.

Otero, J., Sánchez, R., O., E., Milena Álvarez, C., Gómez, C. E., H. C., Enrique Castro, C., Palacios, A., M. A., y C. (2010). Protocolo para la identificación y evaluación de los procesos de degradación de suelos y tierras por erosión. Instituto geográfico Agustín Codazzi; Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales; Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Oyegbile, O. B., y Ayininuola, G. M. (2013). Laboratory studies on the influence of crude oil spillage on lateritic soil shear strength: A case study of Niger Delta Area of Nigeria. *Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering*, 3(2), 73–83.

PEMEX. (2016). *Informe de Sustentabilidad 2008. Informe de Sustentabilidad 2016 (Vol. 1.1)*.

Pereira Morales, C.A., Maycotte Morales, C.C., Restrepo , B.E., Mauro, F., Calle Montes, A. y Esther Velarde, M.J. (2011). *Edafología 1. Espacio geográfico comunicaciones S.A. Colombia*. Pp. 168.

Pérez, G., Iturbide, R., y Flores, R. M. (2006). Cambio en las propiedades físicas de un suelo contaminado con hidrocarburos debido a la aplicación de una tecnología de remediación. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, 1(1), 1–10.

Rahman, Z., Hamzah, U., y Taha, M. (2010). Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil Zulfahmi. *American Journal of Applied Sciences*, 7(7), 954–961.

Ramos V., E. y zuñiga D., Doris. (2008). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología aplicada* 7(1,2), 123-130.

REPSOL. (2003). DIESEL e +. Hoja de datos de seguridad según NORMA MEXICANA NOM-018-STPS-2015. 1-11.

Rocha, M., y Ruíz, U. (2012). Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios.

Roldán, A., e Iturbe, R. (2002). Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas. Instituto de Ingeniería, UNAM. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Safehian, H., Rajabi, A.M. y Ghasemzadeh, H. (2018). Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. 241. 55-63.

Sanscartier, D., Reimer, K., Zeeb, B., y George, K. (2010). Management of hydrocarbon-contaminated soil through bioremediation and landfill disposal at a remote location in Northern Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(1), 147–155.

Saval, S. (1999). Éxitos y fracasos de la remediación de suelos en sitios contaminados con hidrocarburos.

Álvarez-Manilla, A., Valadéz Castro, J.P., Garnica Anguas, Paul y Martínez Peña, G.E.I. (2002). La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura del transporte. SCT. Publicación Técnica No. 195.

SEMARNAT (2016). Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados, Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, 1-72.

SEMSIG. (2004). 8° Simposio nacional de la sociedad española de mecánica del suelo e ingeniería geotécnica. Geotecnia ambiental y mejora del terreno. En SEMSIG (Ed.), Descontaminación de suelos con presencia de compuestos orgánicos (pp. 11–27).

Seoánez, M., Chacón, A., Gutiérrez, A., y Angulo, I. (1999). Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión. Mundi-Prensa.

Sepúlveda, T. V., y Trejo, J. V. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Jiménez Editores.

Shin, E. C., y Das, B. M. (2001). Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 11(3), 220–226.

Sowers, G.F. (1979). Application of Results of exploratory Borings and Index properties to Soil Engineering Problems. Simposio Internacional de Mecánica de suelos. p. 3-15, Oaxaca, Oax.

State, O. (2014). Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 3(4), 816–824.

Suprema Corte de Justicia de la Nación. (2012). Tesis Jurisprudencial 107/2012, “Principio pro persona. Criterio de la selección de la norma de derecho fundamental aplicable”, 10a. Época, 1a. Sala, Semanario Judicial de la Federación y su Gaceta, 799.

Tejado, M. (2014). La contaminación del suelo por residuos peligrosos y su regulación en México. Flores Editor y Distribuidor. México, DF: Editorial Flores.

Torora, G., Funke, B. y Christine, C. (2007). Introducción a la microbiología. 9ma Edición. Medica Panamericana.

Trujillo, M. A., y Ramírez, J. F. (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. *Enzyme and Microbial Technology*, IX(3), 37,39. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.06.001>.

Wackett, L. P., y Bruce, N. C. (2014). Environmental biotechnology. *ARBOR Ciencia, Pensamiento Y Cultura*, 190(768), 1–13.

Zepeda Garrido, J. A. (2004). Mecánica de suelos no saturados. UAQ/Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.

Zytner, R. G., Salb, A., Brook, T. R., Leunissen, M., y Stiver, W. H. (2001). Bioremediation of diesel fuel contaminated soil. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(S1), 131–140.

Apéndice A

**CARACTERIZACIÓN
QUÍMICA DEL SUELO**

Dirección General de Bibliotecas UAQ

A.1 Contenido de humedad y materia orgánica en el suelo natural

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA								
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		Repetición 1, 2 y 3						
Datos del ensaye: ASTM D2974-13								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _w (g)	w %	w̄ %
1	1.06	51.07	37.23	50.01	36.17	13.84	38.26	37.26
2	1.06	51.45	38.09	50.39	37.03	13.36	36.08	
3	1.04	51.52	37.86	50.48	36.49	13.66	37.43	
N°	W _t (g)	W _{t+ms} (g)	W _{t+mc} (g)	W _{ms} (g)	W _{mc} (g)	c %	MO %	MO %
1	1.06	37.23	35.15	36.17	34.09	94.25%	5.75%	5.73%
2	1.06	38.09	36.15	37.03	35.09	94.76%	5.24%	
3	1.04	37.53	35.27	36.49	34.23	93.81%	6.19%	
Wt: Peso de la tara; Wmh: Peso de la muestra húmeda; Wms: Peso de la muestra seca; Ww: Peso del agua; Wmc: Peso de las cenizas w(%): Ww/Ws, contenido de humedad; c(%):Wmc/Wms, porcentaje de cenizas; MO(%)=1-c(%), contenido de materia orgánica								

A.2 Contenido de líquidos y materia orgánica en el suelo contaminado

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA								
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		Repetición 1, 2 y 3						
Datos del ensaye: ASTM D2974-13								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _w (g)	ℓ %	ℓ̄ %
1	1.06	50.16	44.25	49.10	43.19	5.91	13.68	13.33
2	1.06	48.39	42.93	47.33	41.87	5.46	13.04	
3	1.04	50.47	44.68	49.43	43.64	5.79	13.27	
N°	W _t (g)	W _{t+ms} (g)	W _{t+mc} (g)	W _{ms} (g)	W _{mc} (g)	c %	MO %	MO %
1	1.06	44.25	40.68	43.19	39.62	91.73%	8.27%	8.67%
2	1.06	42.93	39.51	41.87	38.45	91.83%	8.17%	
3	1.04	44.68	40.50	43.64	39.46	90.42%	9.58%	
Wt: Peso de la tara; Wmh: Peso de la muestra húmeda; Wms: Peso de la muestra seca; Wℓ: Peso del agua; Wmc: Peso de las cenizas; w(%): Wℓ/Ws, contenido de humedad; c(%):Wmc/Wmh, porcentaje de cenizas; MO(%)=1-c(%), contenido de materia orgánica								

A.5 Contenido líquidos y de materia orgánica en el suelo tratado mediante atenuación natural

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA								
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		Repetición 1, 2 y 3						
Datos del ensaye: ASTM D2974-13								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _w (g)	ℓ %	$\bar{\ell}$ %
1	12.32	72.34	64.87	60.02	52.55	7.47	14.22	15.14
2	12.76	66.54	59.45	53.78	46.69	7.09	15.19	
3	24.50	79.62	72.01	55.12	47.51	7.61	16.02	
N°	W _t (g)	W _{t+ms} (g)	W _{t+mc} (g)	W _{ms} (g)	W _{mc} (g)	c %	MO %	MO %
1	12.32	64.87	59.39	52.55	47.07	89.57%	10.43%	10.40%
2	12.76	59.45	54.66	46.69	41.90	89.74%	10.26%	
3	24.5	72.01	67.02	47.51	42.52	89.50%	10.50%	
Wt: Peso de la tara; Wmh: Peso de la muestra húmeda; Wms: Peso de la muestra seca; Wℓ: Peso de líquidos; Wmc: Peso de las cenizas; ℓ(%): Wℓ/Ws, contenido de líquidos; c(%): Wmc/Wms, porcentaje de cenizas; MO(%)=1-c(%), contenido de materia orgánica								

Apéndice B

**CARACTERIZACIÓN
GEOTÉCNICA DEL SUELO**

Dirección General de Bibliotecas UAQ

B.1 Suelo Natural

B.1.1 Peso específico

Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado							
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>							
Identificación del sondeo:		<u>Repetición 1, 2 y 3</u>							
Datos del ensaye: ASTM D427-04									
N°	W _t (g)	W _{pet} (g)	W _{t+m} No.	W _{pet} +hg(desplazado) (g)	γ _{mmHg} (g/cm ³)	W _m (g)	V _m (cm ³)	γ _m (g/cm ³)	$\bar{\gamma}_m$ (g/cm ³)
1	130.37	93.99	165.85	419.87	13.58	35.48	24.00	1.48	1.54
2	120.89	93.99	162.93	456.28	13.58	42.04	26.68	1.58	
3	125.65	93.99	193.91	691.52	13.58	68.26	44.00	1.55	
W _{pet} : Peso de la caja petri W _{pet} +hg(desplazado): Peso de la caha petri + mercurio desplazado W _m : Peso de la muestra; W _t : Peso de la tara; W _t : Peso de la tara; V _s : Volumen de sólidos γ _m : W _m /V _s									

B.1.2 Contenido de humedad

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE HUMEDAD								
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		<u>Repetición 1, 2 Y 3</u>						
Datos del ensaye: ASTM D2216-10								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _w (g)	w %	\bar{w} %
1	130.37	165.85	156.49	35.48	26.12	9.36	35.83	36.11
2	120.89	162.86	151.53	41.97	30.64	11.33	36.98	
3	125.65	193.76	175.91	68.11	50.26	17.85	35.52	
W _t : Peso de la tara; W _{mh} : Peso de la muestra húmeda; W _{ms} : Peso de la muestra seca; W _w : Peso del agua w(%): W _w /W _s , contenido de humedad								

B.1.3 Peso específico relativo de sólidos

Datos de la muestra: Suelo No Contaminado					Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>110±5°C</u>						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 1</u>											
Descripción de la muestra	Matraz No.	WMws (g)	WMw (g)	Temp. Promedio °C	Tara No.	Wt (g)	Wt + Ws (g)	Ws (g)	Vs (cm³)	Ss	\bar{S}_s
Arcilla color negra	5	697.02	663.16	55.0	2	130.39	183.93	53.54	19.68	2.72	2.73
Arcilla color negra	5	699.65	665.55	44.5	2	130.39	183.93	53.54	19.44	2.75	
Arcilla color negra	5	701.43	667.35	35.0	2	130.39	183.93	53.54	19.46	2.75	
Arcilla color negra	5	703.15	669.38	21.0	2	130.39	183.93	53.54	19.77	2.71	
Wfw: Peso (M+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos						
Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara			Ss: Ws/ (Vs γ _o), γ _o = 1 g/cm³						

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

Datos de la muestra: Suelo No Contaminado					Datos del ensaye: ASTM D854-14							
Ubicación del sondeo: Santa Rosa Jauregui					Horno: 110±5°C							
Identificación del sondeo: Repetición 2												
Descripción de la muestra	Matraz No.	WMws (g)	WMw (g)	Temp. Promedio °C	Tara No.	Wt (g)	Wt + Ws (g)	Ws (g)	Vs (cm³)	Ss	\bar{S}_s	
Arcilla color negra	5	696.46	662.14	59.0	58	117.95	172.19	54.24	19.92	2.72	2.73	
Arcilla color negra	5	699.51	664.69	48.5	58	117.95	172.19	54.24	19.42	2.79		
Arcilla color negra	5	701.05	666.82	38.0	58	117.95	172.19	54.24	20.01	2.71		
Arcilla color negra	5	703.55	669.38	21.0	58	117.95	172.19	54.24	20.07	2.70		
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t° Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración					Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración Wt: Peso de la tara			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm³				

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

Datos de la muestra: Suelo No Contaminado					Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>105±5°C</u>						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 3</u>											
Descripción de la muestra	Matraz No.	WMws (g)	WMw (g)	Temp. Promedio °C	Tara No.	Wt (g)	Wt + Ws (g)	Ws (g)	Vs (cm³)	Ss	\bar{S}_s
Arcilla color negra	2	681.39	644.02	57.0	71	120.76	179.84	59.08	21.71	2.72	2.72
Arcilla color negra	2	683.48	645.88	49.0	71	120.76	179.84	59.08	21.48	2.75	
Arcilla color negra	2	685.94	648.60	35.0	71	120.76	179.84	59.08	21.74	2.72	
Arcilla color negra	2	687.73	650.60	21.5	71	120.76	179.84	59.08	21.95	2.69	
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm³			
Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara									

Temperatura (°C)	Wfw (g)
59.0	643.75
50.0	645.54
41.0	647.47
28.0	649.66
24.0	650.53
20.0	650.89
13.0	651.57
8.5	651.82

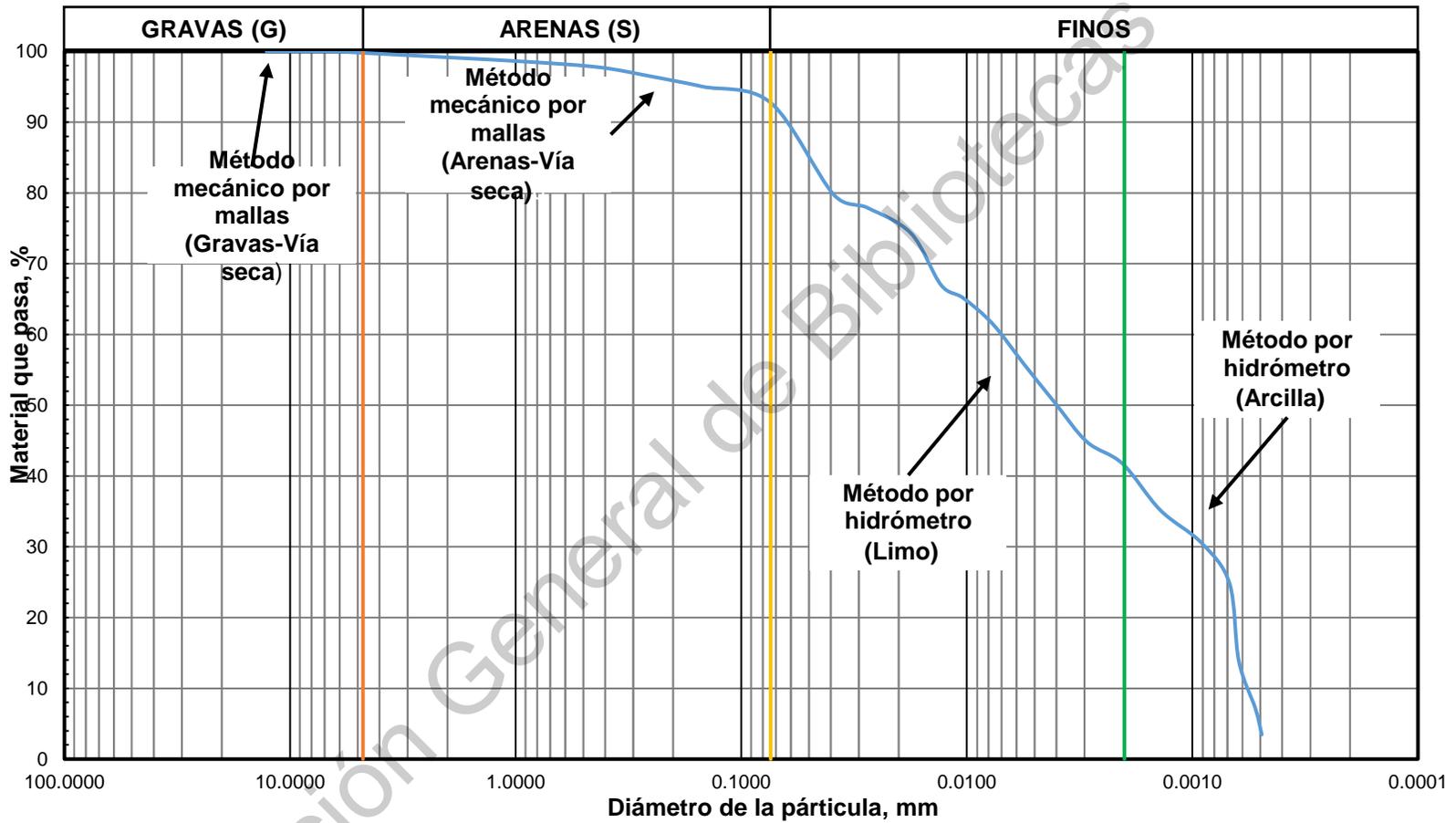
Calibración

$y = -0.0017x^2 - 0.0521x + 652.51$
 $R^2 = 0.9977$

B.1.4 Granulometría

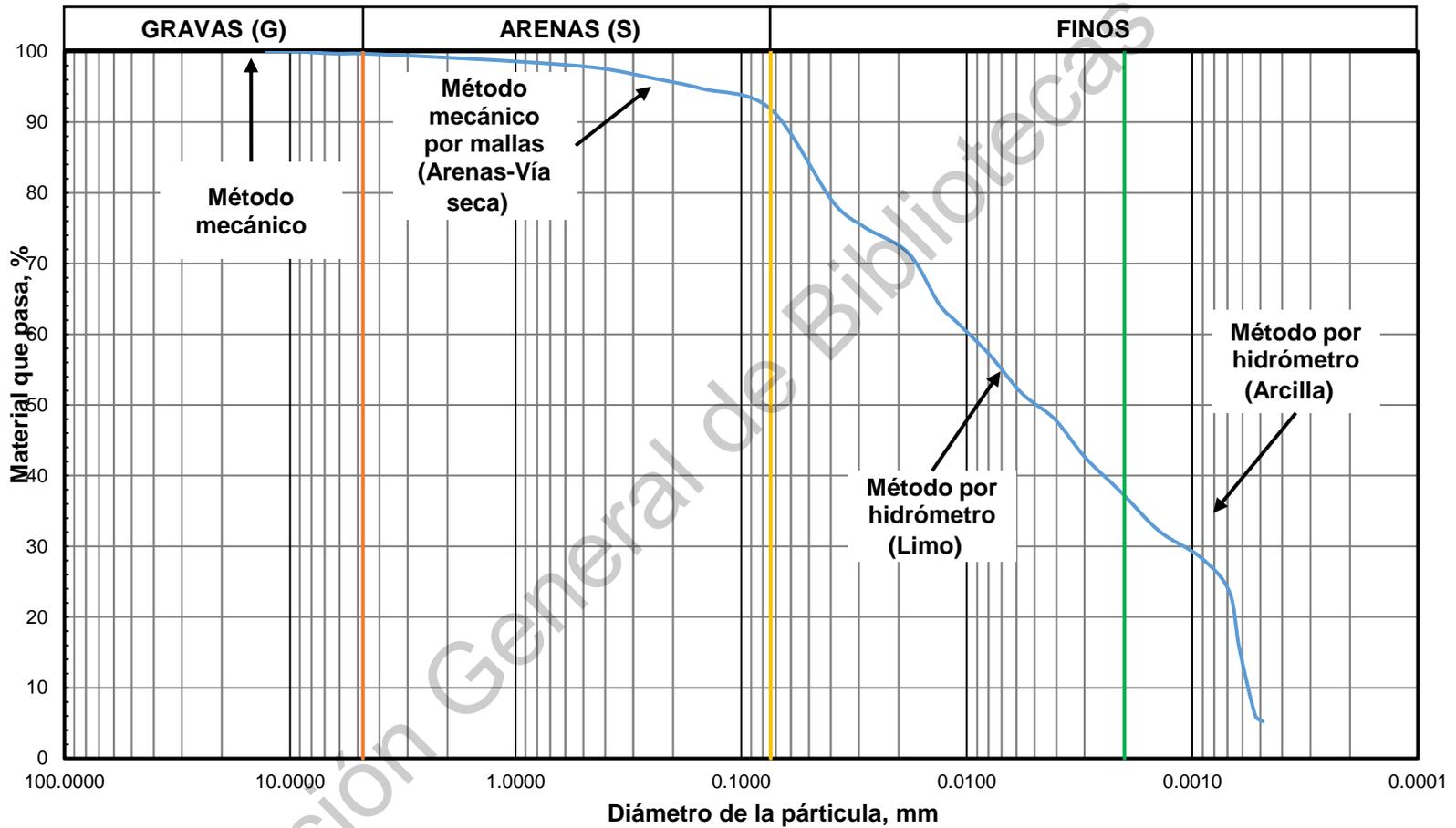
DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 1		
Datos del ensayo: ASTM D6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		230.29 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.46	0.20	99.80
Grava		0.46		
Peso de la muestra para este ensayo:		229.83 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	1.45	0.63	99.17
No. 20	0.840	1.53	0.66	98.51
No. 40	0.420	1.75	0.76	97.75
No. 60	0.250	2.93	1.27	96.47
No. 100	0.149	3.27	1.42	95.05
No. 200	0.074	5.29	2.30	92.76
Arena		16.22	7.04	
Paso N°200 (Finos)		213.61		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0388	29.96	13.01	79.75
	0.0276	4.20	1.82	77.93
	0.0176	8.40	3.65	74.28
	0.0130	16.79	7.29	66.99
	0.0104	4.20	1.82	65.17
	0.0077	8.40	3.65	61.52
	0.0056	13.22	5.74	55.78
	0.0041	12.59	5.47	50.31
	0.0029	12.59	5.47	44.84
	0.0020	7.14	3.10	41.74
	0.0014	15.11	6.56	35.18
	0.0009	10.70	4.65	30.53
	0.0007	13.22	5.74	24.79
	0.0006	25.19	10.94	13.85
	0.0005	15.53	6.74	7.11
Limo			51.01	
Arcilla			41.74	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)											
Datos de la muestra:						Suelo No Contaminado					
Ubicación del sondeo:						Santa Rosa Jauregui					
Identificación del sondeo:						Repetición 1					
Datos del ensaye: ASTM D422 - 63 2007											
AGENTE DISPERSOR :			MATERIAL : -			FACTORES DE CORRECCIÓN :			HIDRÓMETRO :		
Tipo = NaPO ₆			Muestra: A2			Cero (Cc)= 0 g/lt			Tipo = 152H		
Cantidad = 5 %			Ss = 2.73			Menisco (Cm) = 1 g/lt			$P = (R_a/W) \times 100$ $D = K(L/T)^{1/2}$		
HORA DE INICIO: 11:44am			W muestra = 50 g			Fc a = 0.98					
FECHA: 18-oct-18			Finos= 92.76 %			Defloculante (Cd) = -5 g/lt					
Malla No. = 200											
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/lt).	Phid / Pmec %	Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm
18-10-18		00:01	1	22.5	47.00	0.75	43.75	86% 79.75%	9.10	0.012870	0.0388
18-10-18		00:02	2	22.5	46.00	0.75	42.75	84% 77.93%	9.20	0.012870	0.0276
18-10-18		00:05	5	22.5	44.00	0.75	40.75	80% 74.28%	9.40	0.012870	0.0176
18-10-18		00:10	10	22.5	40.00	0.75	36.75	72% 66.99%	10.20	0.012870	0.0130
18-10-18		00:16	16	22.5	39.00	0.75	35.75	70% 65.17%	10.40	0.012870	0.0104
18-10-18		00:30	30	22.5	37.00	0.75	33.75	66% 61.52%	10.70	0.012870	0.0077
18-10-18		01:00	60	22.0	34.00	0.60	30.60	60% 55.78%	11.10	0.012940	0.0056
18-10-18		02:00	120	22.0	31.00	0.60	27.60	54% 50.31%	11.80	0.012940	0.0041
18-10-18		03:59	239	22.0	28.00	0.60	24.60	48% 44.84%	12.30	0.012940	0.0029
18-10-18		08:12	492	23.0	26.00	0.90	22.90	45% 41.74%	12.50	0.012790	0.0020
19-10-18		19:36	1176	21.0	23.00	0.30	19.30	38% 35.18%	13.20	0.013090	0.0014
20-10-18		45:01	2701	22.5	20.00	0.75	16.75	33% 30.53%	13.50	0.012870	0.0009
22-10-18		84:09	5049	22.0	17.00	0.60	13.60	27% 24.79%	14.10	0.012940	0.0007
23-10-18		108:49	6529	22.0	11.00	0.60	7.60	15% 13.85%	15.10	0.012940	0.0006
26-10-18		181:07	10867	23.0	5.00	0.90	1.90	4% 3.46%	16.10	0.012790	0.0005



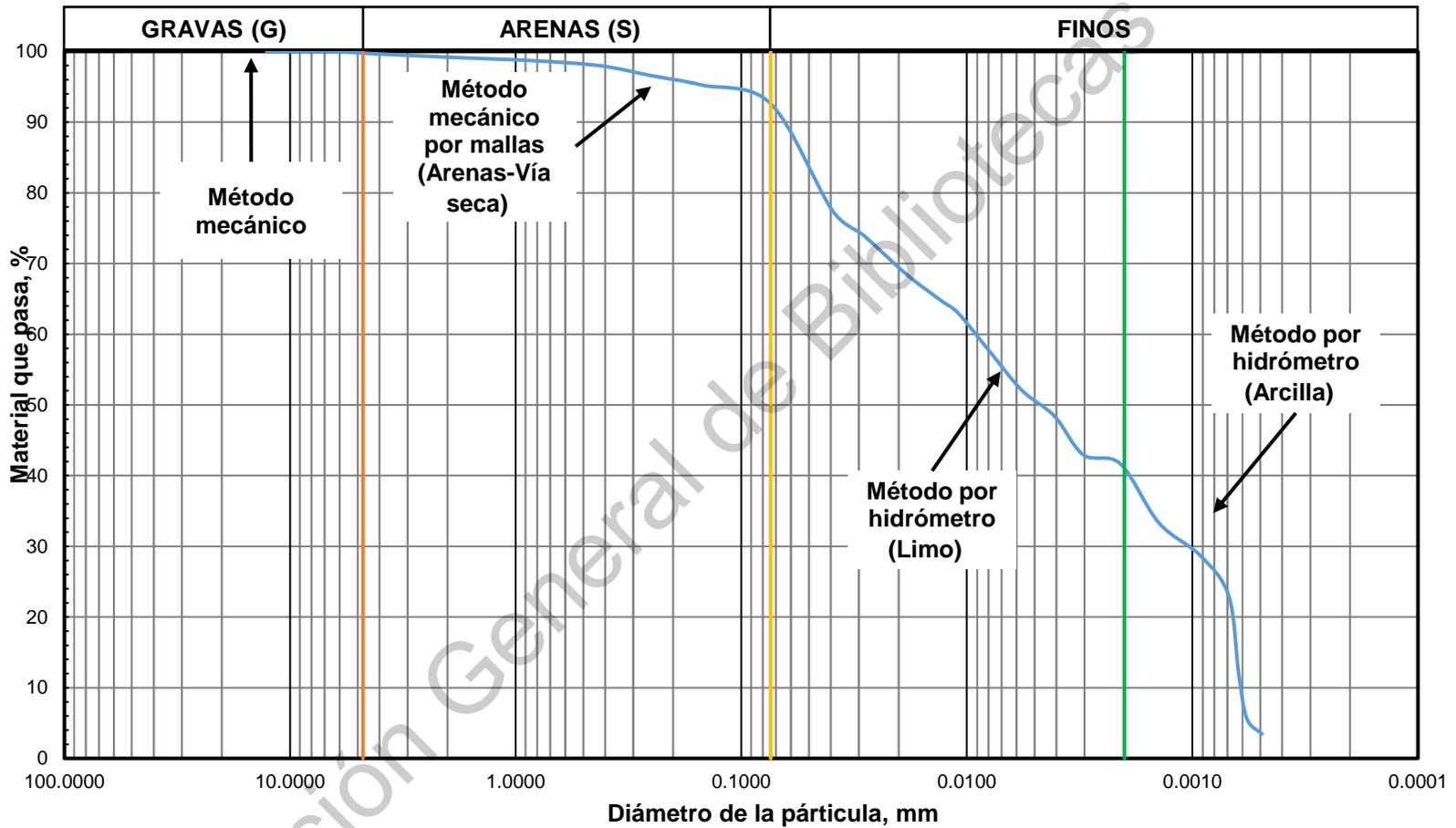
DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 2		
Datos del ensayo: ASTM D6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		212 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.65	0.31	99.69
No. 4	4.75	0.00	0.00	99.69
Grava		0.65	0.31	
Peso de la muestra para este ensayo:		211.54 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	1.21	0.57	99.12
No. 20	0.840	1.45	0.68	98.44
No. 40	0.420	1.74	0.82	97.62
No. 60	0.250	2.89	1.36	96.26
No. 100	0.149	3.23	1.52	94.74
No. 200	0.074	6.13	2.89	91.85
Arena		16.65	7.85	
Paso N°200 (Finos)		194.89		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0391	27.91	13.15	78.70
	0.0282	7.66	3.61	75.09
	0.0181	7.66	3.61	71.48
	0.0133	15.32	7.22	64.26
	0.0109	5.74	2.71	61.55
	0.0079	9.57	4.51	57.04
	0.0057	11.49	5.41	51.62
	0.0041	7.66	3.61	48.01
	0.0030	11.49	5.41	42.60
	0.0021	10.34	4.87	37.72
	0.0014	11.87	5.60	32.13
	0.0009	7.85	3.70	28.43
	0.0007	10.15	4.78	23.64
	0.0006	17.23	8.12	15.52
	0.0005	19.92	9.39	6.14
Limo			54.12	
Arcilla			37.72	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)															
Datos de la muestra:			Suelo No Contaminado												
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui												
Identificación del sondeo:			Repetición 2												
Datos del ensaye: ASTM D422 - 63 2007															
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>11:56</u> FECHA: <u>18-oct-18</u>			MATERIAL : Muestra: <u>B2</u> Ss = <u>2.73</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>91.85</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/l Menisco (Cm) = <u>1</u> g/l Fc α = <u>0.98</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/l				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_a/W)x100$ $D = K(L/T)^{1/2}$					
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/l)	C _T (g/l)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/l).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm			
18-10-18		00:01	1	22.0	47.00	0.60	43.60	86%	78.70%	9.15	0.012940	0.0391			
18-10-18		00:02	2	22.0	45.00	0.60	41.60	82%	75.09%	9.50	0.012940	0.0282			
18-10-18		00:05	5	22.0	43.00	0.60	39.60	78%	71.48%	9.80	0.012940	0.0181			
18-10-18		00:10	10	22.0	39.00	0.60	35.60	70%	64.26%	10.50	0.012940	0.0133			
18-10-18		00:15	15	22.0	37.50	0.60	34.10	67%	61.55%	10.70	0.012940	0.0109			
18-10-18		00:30	30	22.0	35.00	0.60	31.60	62%	57.04%	11.15	0.012940	0.0079			
18-10-18		01:00	60	22.0	32.00	0.60	28.60	56%	51.62%	11.60	0.012940	0.0057			
18-10-18		02:00	120	22.0	30.00	0.60	26.60	52%	48.01%	11.95	0.012940	0.0041			
18-10-18		03:53	233	22.0	27.00	0.60	23.60	46%	42.60%	12.45	0.012940	0.0030			
18-10-18		08:01	489	23.0	24.00	0.90	20.90	41%	37.72%	12.90	0.012790	0.0021			
19-10-18		19:25	1165	21.0	21.50	0.30	17.80	35%	32.13%	13.30	0.013090	0.0014			
20-10-18		44:50	2690	22.5	19.00	0.75	15.75	31%	28.43%	13.70	0.012865	0.0009			
22-10-18		83:58	5038	22.0	16.50	0.60	13.10	26%	23.64%	14.20	0.012940	0.0007			
23-10-18		108:39	6519	22.0	12.00	0.60	8.60	17%	15.52%	14.90	0.012940	0.0006			
25-10-18		154:04	9244	23.0	6.50	0.90	3.40	7%	6.14%	15.70	0.012790	0.0005			



DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 3		
Datos del ensaye: ASTM D6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		207.39 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.50	0.24	99.76
Grava		0.50	0.24	
Peso de la muestra para este ensayo:		206.89 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	1.18	0.57	99.19
No. 20	0.840	1.01	0.49	98.70
No. 40	0.420	1.51	0.73	97.97
No. 60	0.250	2.88	1.39	96.58
No. 100	0.149	2.76	1.33	95.25
No. 200	0.074	5.47	2.64	92.61
Arena		14.81	7.15	
Paso N°200 (Finos)		192.08		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0395	31.28	15.08	77.53
	0.0284	7.55	3.64	73.89
	0.0184	11.32	5.46	68.43
	0.0130	7.55	3.64	64.79
	0.0109	3.77	1.82	62.97
	0.0079	11.32	5.46	57.51
	0.0057	11.32	5.46	52.05
	0.0041	7.55	3.64	48.41
	0.0030	11.32	5.46	42.95
	0.0021	2.64	1.27	41.68
	0.0014	17.36	8.37	33.30
	0.0009	9.62	4.64	28.66
	0.0007	11.89	5.73	22.93
	0.0006	22.65	10.92	12.01
	0.0005	4.53	2.18	3.46
Limo			50.93	
Arcilla			41.68	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)															
Datos de la muestra:			Suelo No Contaminado												
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui												
Identificación del sondeo:			Repetición 3												
Datos del ensaye: ASTM D422 - 63 2007															
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>12:08</u> FECHA: <u>18-oct-18</u>			MATERIAL : Muestra: <u>C2</u> Ss = <u>2.73</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>92.61</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/l Menisco (Cm) = <u>1</u> g/l Fc = <u>0.98</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/l				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_a/W)x100$ $D = K(L/T)^{1/2}$					
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/l)	C _T (g/l)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/l).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm			
18-10-18		00:01	1	22.0	46.00	0.60	42.60	84%	77.53%	9.30	0.012940	0.0395			
18-10-18		00:02	2	22.0	44.00	0.60	40.60	80%	73.89%	9.65	0.012940	0.0284			
18-10-18		00:05	5	22.0	41.00	0.60	37.60	74%	68.43%	10.15	0.012940	0.0184			
18-10-18		00:10	10	22.0	39.00	0.60	35.60	70%	64.79%	10.15	0.012940	0.0130			
18-10-18		00:15	15	22.0	38.00	0.60	34.60	68%	62.97%	10.65	0.012940	0.0109			
18-10-18		00:30	30	22.0	35.00	0.60	31.60	62%	57.51%	11.15	0.012940	0.0079			
18-10-18		01:00	60	22.0	32.00	0.60	28.60	56%	52.05%	11.60	0.012940	0.0057			
18-10-18		02:00	120	22.0	30.00	0.60	26.60	52%	48.41%	11.95	0.012940	0.0041			
18-10-18		03:45	225	22.0	27.00	0.60	23.60	46%	42.95%	12.45	0.012940	0.0030			
18-10-18		07:50	470	23.0	26.00	0.90	22.90	45%	41.68%	12.50	0.012790	0.0021			
20-10-18		44:39	2679	22.5	19.00	0.75	15.75	31%	28.66%	13.70	0.012865	0.0009			
22-10-18		83:47	5027	22.0	16.00	0.60	12.60	25%	22.93%	14.25	0.012940	0.0007			
23-10-18		108:27	6507	22.0	10.00	0.60	6.60	13%	12.01%	15.10	0.012940	0.0006			
25-10-18		153:53	9233	23.0	6.00	0.90	2.90	6%	5.28%	15.80	0.012790	0.0005			



B.1.5 Límites de consistencia

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 1						
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	1	18.4532	170	36.1002	28.4891	7.6111	10.0359	75.84
2	2	18.1280	185	34.6848	27.4969	7.1879	9.3689	76.72
3	3	18.5815	203	30.7828	25.4518	5.3310	6.8703	77.59
4	4	18.2651	234	31.0928	25.4236	5.6692	7.1585	79.20
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	A	53.6434	62.713	60.2246	2.4884	6.5812	37.81	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	LC	18.1771	25.02	55.6918	39.0962	11.18	16.5956	13.17
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	$L_w =$	77.05	$I_p =$
1	A	10.09	7.73067	2.36	23.41	$L_p =$	37.81	39.24
						$L_s =$	13.17	
						$I_L =$	23.41	
Clasificación de finos								MH

CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS

Este gráfico muestra la relación entre el contenido de agua (eje Y, 40-100%) y la penetración (eje X, 150-270 mm). Se observan cuatro puntos de ensayo marcados con 'x' azules, conectados por una línea roja que representa la curva de fluidez.

Este gráfico clasifica el suelo basándose en su Límite Líquido (L_w , eje X, 0-100%) y su Índice de Plasticidad (I_p , eje Y, 0-100%). Se muestran líneas de clasificación: Línea "U" (límite superior de plasticidad) y Línea "A" (límite inferior de plasticidad). Las zonas de clasificación incluyen CL u OL, ML u OL, MH u OH y CH u OH. El punto de ensayo se encuentra en la zona CH u OH.

LIMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:			Suelo No Contaminado					
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui					
Identificación del sondeo:			Repetición 2					
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	1 _B	19.9856	160	34.7025	28.5006	6.2019	8.5150	72.83
2	2 _B	24.3698	186	44.0605	35.6124	8.4481	11.2426	75.14
3	B	18.3602	200	31.0569	25.4985	5.5584	7.1383	77.87
4	3 _B	21.9427	234	37.1775	30.4334	6.7441	8.4907	79.43
5	4 _B	19.7752	255	43.4734	32.9314	10.542	13.1562	80.13
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	B	58.7001	68.7686	66.0994	2.6692	7.3993	36.07	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	LCB	24.18	35.59	77.0199	53.7868	16.32	23.2331	13.39
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	$L_w =$	77.03	$I_P =$
1	B	10.14	7.70	2.45	24.12	$L_P =$	36.07	40.96
						$L_S =$	13.39	
						$I_L =$	24.12	
Clasificación de finos								MH
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo No Contaminado						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 3						
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	1c	22.4685	163	37.3202	30.9647	6.3555	8.4962	74.80
2	2c	20.8755	194	43.1039	33.4539	9.6500	12.5784	76.72
3	3c	21.5890	211	39.5627	31.5996	7.9631	10.0106	79.55
4	4c	22.6276	233	39.9256	32.2550	7.6706	9.6274	79.67
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	C	58.5771	66.7253	64.6831	2.0422	6.106	33.45	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	LCC	24.25	27.55	65.0653	47.2263	12.94	17.839	14.05
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	Δl (cm)	IL	$L_w =$	77.67	$I_p =$
1	C	10.12	7.70	2.43	23.97	$L_p =$	33.45	44.22
						$L_s =$	14.05	
						$I_L =$	23.97	
Clasificación de finos								CH

CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS

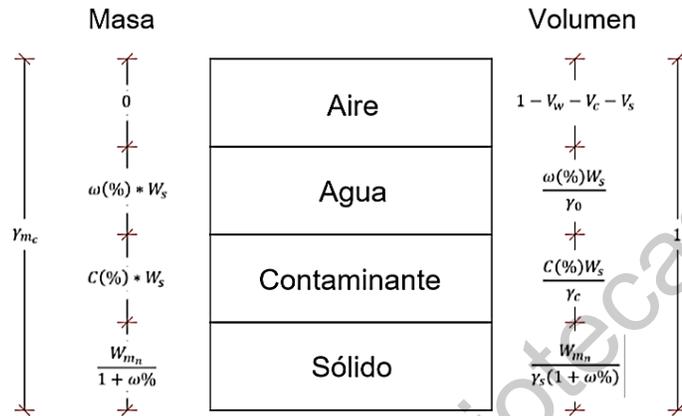
Contenido de agua en % vs Penetración en mm

Índice de plasticidad, I_p , % vs Límite Líquido, L_w , %

Clasificación: CH u OH

B.2 Suelo Contaminado

B.2.1 Peso específico



$\omega := 0.08$ *contenido de agua*
 $\gamma_w := 1$ *densidad agua*
 $c := .0533$ *contenido de contaminante*
 $\gamma_c := 0.832$ *densidad contaminante*
 $S_s := 2.6$ *densidad relativa solidos*
 $W_s = 1.131$
 γ_{mc} *pesovolumetrico muestra contaminada*

$$V_s := \frac{W_s}{S_s \cdot \gamma_w}$$

$$W_c := W_s \cdot c$$

$$W_w := W_s \cdot \omega$$

$$V_c := \frac{W_c}{\gamma_c}$$

$$V_w := \frac{W_w}{\gamma_w}$$

$$V_a := 1 - V_s - V_c - V_w$$

$$V_v := 1 - V_s$$

$$G_w := \frac{V_w}{V_v} \cdot 100$$

$$e := \frac{V_v}{V_s}$$

$$n := \frac{V_v}{V_{mc}} \cdot 100$$

$$V_{mc} := 1$$

$$\gamma_{mc} := W_s + W_c + W_w$$

$$G_w = 16.025$$

$$e = 1.298$$

$$n = 56.483$$

$$\gamma_{mc} = 1.282$$

B.2.2 Contenido de líquidos

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE LÍQUIDOS								
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		Repetición 1, 2 Y 3						
Datos del ensaye: ASTM D2216-10								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _ℓ (g)	ℓ	$\bar{\ell}$ %
1	1.06	50.16	44.25	49.10	43.19	5.91	13.68	13.33
2	1.06	48.39	42.93	47.33	41.87	5.46	13.04	
3	1.04	50.47	44.68	49.43	43.64	5.79	13.27	
W _t : Peso de la tara; W _{mh} : Peso de la muestra húmeda; W _{ms} : Peso de la muestra seca; W _ℓ : Peso del agua ℓ(%): W _ℓ /W _s , contenido de líquidos								

B.2.3 Peso específico relativo de sólidos

Datos de la muestra: Suelo Contaminado					Datos del ensaye: ASTM D854-14																						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>105±5°C</u>																						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 1</u>																											
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss																
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)																		
Arcilla color negra	5	698.97	668.38	28.5	1	124.97	174.44	49.47	18.88	2.62	2.61																
Arcilla color negra	5	699.66	669.00	24.0	1	124.97	174.44	49.47	18.81	2.63																	
Arcilla color negra	5	700.5	670.29	12.0	1	124.97	174.44	49.47	19.26	2.57																	
Wfws: Peso (M+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos																						
Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara			Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm³																						
<table border="1" style="display: inline-table; margin-right: 20px;"> <caption>Calibración Matraz</caption> <thead> <tr> <th>Temperatura (°C)</th> <th>Wfw (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>56.0</td><td>663.02</td></tr> <tr><td>52.0</td><td>664.05</td></tr> <tr><td>42.0</td><td>666.2</td></tr> <tr><td>25.0</td><td>668.76</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>669.55</td></tr> <tr><td>13.0</td><td>670.32</td></tr> <tr><td>7.0</td><td>670.61</td></tr> </tbody> </table> <div style="display: inline-block;"> </div>												Temperatura (°C)	Wfw (g)	56.0	663.02	52.0	664.05	42.0	666.2	25.0	668.76	20.0	669.55	13.0	670.32	7.0	670.61
Temperatura (°C)	Wfw (g)																										
56.0	663.02																										
52.0	664.05																										
42.0	666.2																										
25.0	668.76																										
20.0	669.55																										
13.0	670.32																										
7.0	670.61																										

Datos de la muestra: Suelo Contaminado					Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>105±5°C</u>						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 2</u>											
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)		
Arcilla color negra	5	699.71	669.13	23.0	2	125.65	175.7	50.05	19.47	2.57	2.59
Arcilla color negra	5	700.77	669.92	16.0	2	125.65	175.7	50.05	19.20	2.61	
Arcilla color negra	5	701.05	670.29	12.0	2	125.65	175.7	50.05	19.29	2.59	
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			Ss: Ws/ (Vs γ _s), γ _s = 1 g/cm ³			
Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara									

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

Datos de la muestra: Suelo Contaminado					Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>105±5°C</u>						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 3</u>											
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)		
Arcilla color negra	5	700.45	668.46	28.0	3	125.65	177.59	51.94	19.95	2.60	2.59
Arcilla color negra	5	701.45	669.60	19.0	3	125.65	177.59	51.94	20.09	2.59	
Arcilla color negra	5	701.74	669.82	17.0	3	125.65	177.59	51.94	20.02	2.59	
Arcilla color negra	5	701.85	670.02	15.0	3	125.65	177.59	51.94	20.11	2.58	

Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°
 Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración
 Wt: Peso de la tara
 Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos
 Ss: Ws/ (Vs γ₀), γ₀ = 1 g/cm³

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

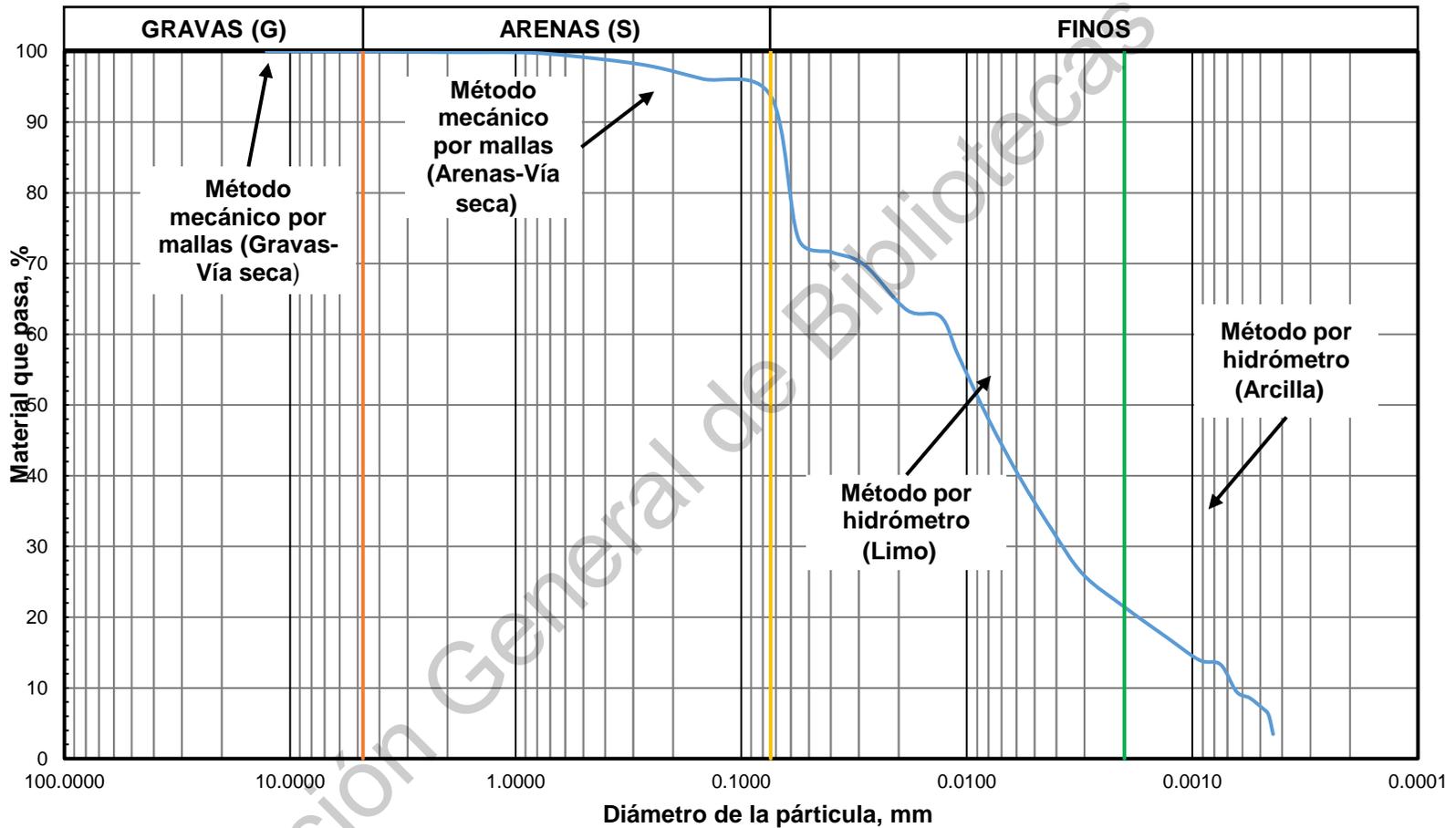
Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

B.2.4 Granulometría

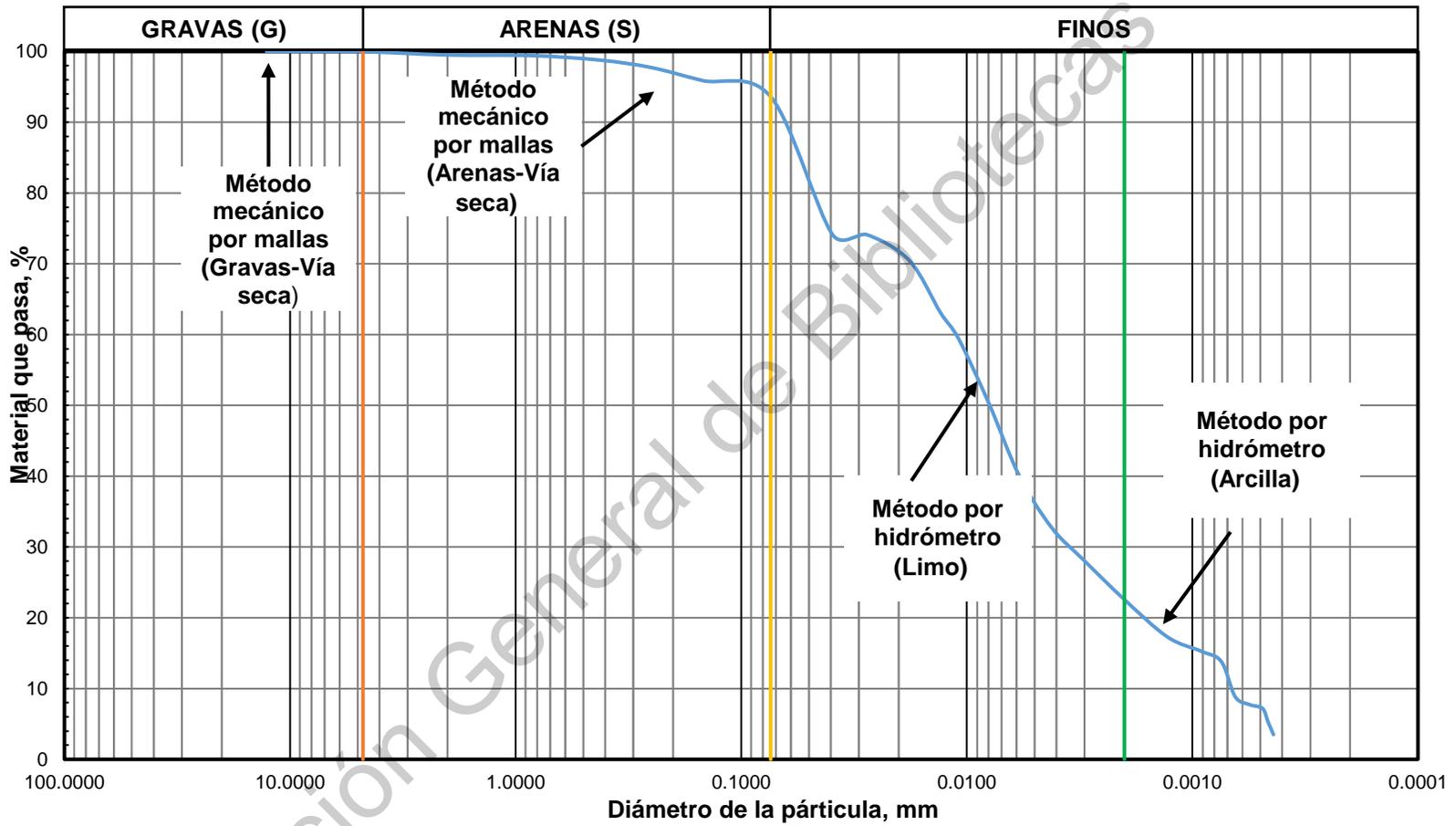
DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 1		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		506.08 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.00	0.00	100.00
Grava		0.00	0.00	
Peso de la muestra para este ensayo:		506.08 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	0.55	0.11	99.89
No. 20	0.840	0.44	0.09	99.80
No. 40	0.420	4.49	0.89	98.92
No. 60	0.250	5.11	1.01	97.91
No. 100	0.149	8.92	1.76	96.14
No. 200	0.074	12.28	2.43	93.72
Arena		31.79	6.28	
Paso N°200 (Finos)		474.29		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0557	102.52	20.26	73.46
	0.0398	9.22	1.82	71.64
	0.0284	9.22	1.82	69.81
	0.0184	32.29	6.38	63.43
	0.0131	4.61	0.91	62.52
	0.0109	27.67	5.47	57.05
	0.0080	46.12	9.11	47.94
	0.0058	41.51	8.20	39.74
	0.0042	36.90	7.29	32.45
	0.0031	32.29	6.38	26.07
	0.0020	23.98	4.74	21.33
	0.0013	21.22	4.19	17.13
	0.0009	16.14	3.19	13.94
	0.0007	3.23	0.64	13.31
	0.0006	19.37	3.83	9.48
	0.0006	4.61	0.91	8.57
	0.0005	7.38	1.46	7.11
	0.0004	13.84	2.73	3.46
Limo			72.39	
Arcilla			21.33	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)															
Datos de la muestra:			Suelo Contaminado												
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui												
Identificación del sondeo:			Repetición 1												
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007															
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>11:12</u> FECHA: <u>24-sep-18</u>			MATERIAL : Muestra: <u>A2</u> Ss = <u>2.73</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>92.76</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/l Menisco (Cm) = <u>1</u> g/l Fc α = <u>0.98</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/l				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_a/W) \times 100$ $D = K(L/T)^{1/2}$					
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/l)	C _T (g/l)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/l).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm			
24-09-18		00:00:30	0.5	24.0	43.00	1.30	40.30	79%	73.46%	9.70	0.012640	0.0557			
24-09-18		00:01	1	24.0	42.00	1.30	39.30	77%	71.64%	9.90	0.012640	0.0398			
24-09-18		00:02	2	24.0	41.00	1.30	38.30	75%	69.81%	10.10	0.012640	0.0284			
24-09-18		00:05	5	24.0	37.50	1.30	34.80	68%	63.43%	10.60	0.012640	0.0184			
24-09-18		00:10	10	24.0	37.00	1.30	34.30	67%	62.52%	10.70	0.012640	0.0131			
24-09-18		00:15	15	24.0	34.00	1.30	31.30	62%	57.05%	11.20	0.012640	0.0109			
24-09-18		00:30	30	24.0	29.00	1.30	26.30	52%	47.94%	12.00	0.012640	0.0080			
24-09-18		01:00	60	24.0	24.50	1.30	21.80	43%	39.74%	12.70	0.012640	0.0058			
24-09-18		02:00	120	24.0	20.50	1.30	17.80	35%	32.45%	13.30	0.012640	0.0042			
24-09-18		04:00	240	24.0	17.00	1.30	14.30	28%	26.07%	14.00	0.012640	0.0031			
24-09-18		09:30	570	25.0	14.00	1.70	11.70	23%	21.33%	14.30	0.012490	0.0020			
25-09-18		24:00	1440	23.0	12.50	0.90	9.40	18%	17.13%	14.80	0.012790	0.0013			
26-09-18		48:00	2880	23.5	10.50	1.15	7.65	15%	13.94%	15.10	0.012865	0.0009			
27-09-18		72:00	4320	24.0	10.00	1.30	7.30	14%	13.31%	15.20	0.012640	0.0007			
28-09-18		99:08	5948	25.0	7.50	1.70	5.20	10%	9.48%	15.50	0.012490	0.0006			
01-10-18		178:43	10723	23.0	7.00	0.90	3.90	8%	7.11%	15.60	0.012790	0.0005			
03-10-18		226:41	13601	23.0	5.00	0.90	1.90	4%	3.46%	16.00	0.012790	0.0004			



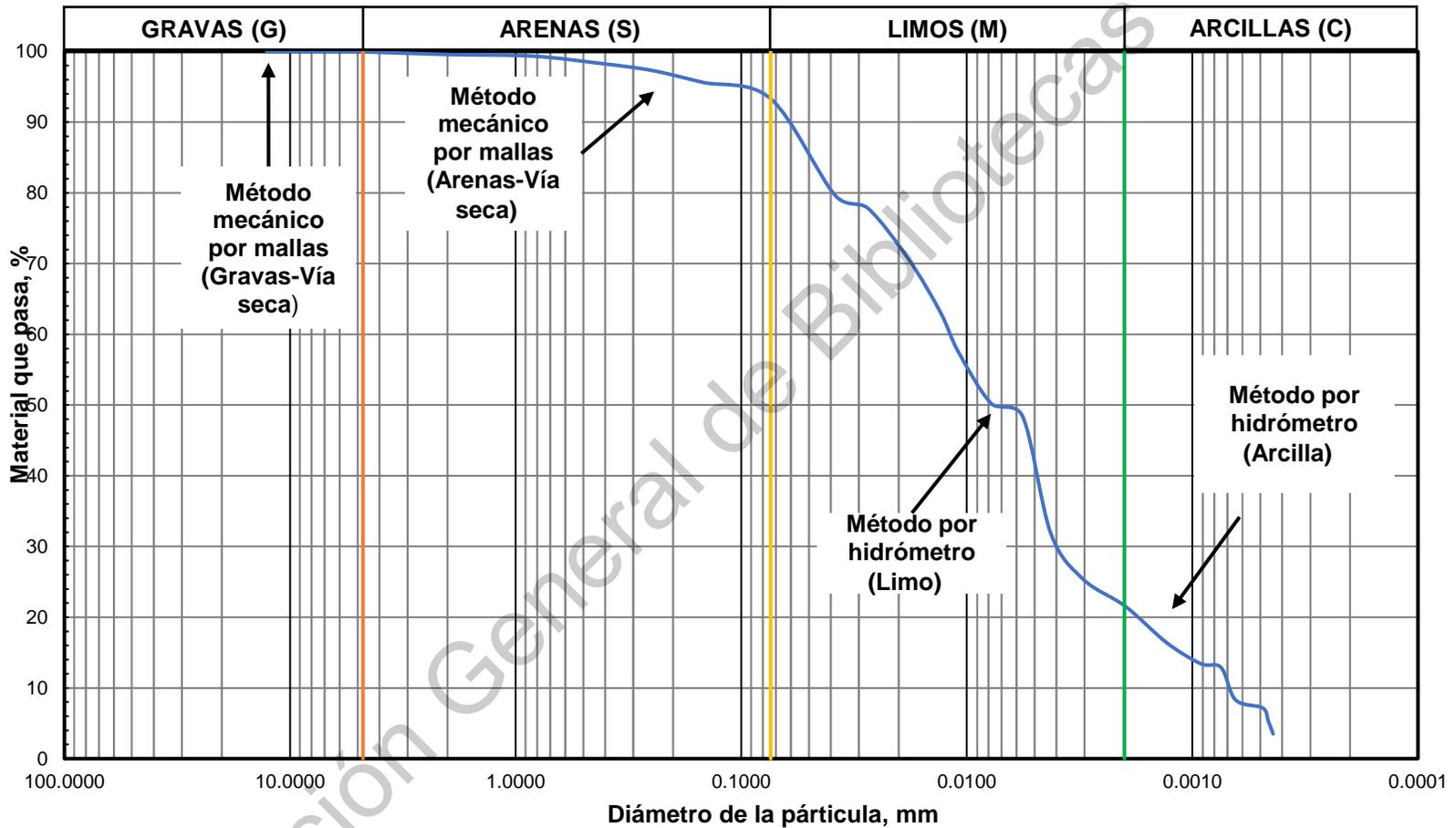
ETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 2		
Datos del ensaye: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		500.01 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.00	0.00	100.00
Grava		0.00	0.00	
Peso de la muestra para este ensayo:		500.01 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	2.44	0.49	99.51
No. 20	0.840	0.46	0.09	99.42
No. 40	0.420	3.20	0.64	98.78
No. 60	0.250	5.23	1.05	97.73
No. 100	0.149	9.11	1.82	95.91
No. 200	0.074	11.48	2.30	93.62
Arena		31.92	6.38	
Paso N°200 (Finos)		468.09		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0394	97.39	19.48	74.14
	0.0278	0.00	0.00	74.14
	0.0180	18.40	3.68	70.46
	0.0131	36.79	7.36	63.10
	0.0109	18.40	3.68	59.42
	0.0080	45.99	9.20	50.22
	0.0059	50.59	10.12	40.10
	0.0042	36.79	7.36	32.75
	0.0030	23.00	4.60	28.15
	0.0020	27.60	5.52	22.63
	0.0013	26.68	5.33	17.29
	0.0009	10.12	2.02	15.27
	0.0007	7.36	1.47	13.80
	0.0006	24.84	4.97	8.83
	0.0006	5.52	1.10	7.73
	0.0005	2.76	0.55	7.17
	0.0004	9.20	1.84	3.50
Limo			70.99	
Arcilla			22.63	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)														
Datos de la muestra:				Suelo Contaminado										
Ubicación del sondeo:				Santa Rosa Jauregui										
Identificación del sondeo:				Repetición 2										
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007														
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>11:08</u> FECHA: <u>24-sep-18</u>			MATERIAL : Muestra: <u>B2</u> Ss = <u>2.73</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>93.62</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/lt Menisco (Cm) = <u>1</u> g/lt Fc α = <u>0.98</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/lt				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_a/W)x100$ $D = K(L/T)^{1/2}$				
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/lt).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm		
24-09-18		00:01	1	24.0	43.00	1.30	40.30	79%	74.14%	9.70	0.012640	0.0394		
24-09-18		00:02	2	24.0	43.00	1.30	40.30	79%	74.14%	9.70	0.012640	0.0278		
24-09-18		00:05	5	24.0	41.00	1.30	38.30	75%	70.46%	10.10	0.012640	0.0180		
24-09-18		00:10	10	24.0	37.00	1.30	34.30	67%	63.10%	10.70	0.012640	0.0131		
24-09-18		00:15	15	24.0	35.00	1.30	32.30	63%	59.42%	11.10	0.012640	0.0109		
24-09-18		00:30	30	24.0	30.00	1.30	27.30	54%	50.22%	11.90	0.012640	0.0080		
24-09-18		01:00	60	24.0	24.50	1.30	21.80	43%	40.10%	12.90	0.012640	0.0059		
24-09-18		02:00	120	24.0	20.50	1.30	17.80	35%	32.75%	13.30	0.012640	0.0042		
24-09-18		04:00	240	24.0	18.00	1.30	15.30	30%	28.15%	13.80	0.012640	0.0030		
24-09-18		09:25	565	24.0	15.00	1.30	12.30	24%	22.63%	14.30	0.012640	0.0020		
25-09-18		23:55	1435	23.0	12.50	0.90	9.40	18%	17.29%	14.60	0.012790	0.0013		
26-09-18		47:55	2875	24.0	11.00	1.30	8.30	16%	15.27%	15.00	0.012640	0.0009		
27-09-18		71:55	4315	24.5	10.00	1.50	7.50	15%	13.80%	15.10	0.012570	0.0007		
28-09-18		99:04	5944	24.0	7.50	1.30	4.80	9%	8.83%	15.50	0.012640	0.0006		
01-10-18		178:30	10710	23.0	7.00	0.90	3.90	8%	7.17%	15.60	0.012790	0.0005		
03-10-18		228:17	13697	23.0	5.00	0.90	1.90	4%	3.50%	16.00	0.012790	0.0004		



DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 3		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		500.36 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.26	0.05	99.95
Grava		0.26	0.05	
Peso de la muestra para este ensayo:		500.10 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	1.89	0.38	99.57
No. 20	0.840	1.14	0.23	99.34
No. 40	0.420	5.16	1.03	98.31
No. 60	0.250	4.90	0.98	97.33
No. 100	0.149	8.37	1.67	95.66
No. 200	0.074	11.74	2.35	93.31
Arena		33.20	6.64	
Paso N°200 (Finos)		466.90		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0383	68.33	13.66	79.66
	0.0274	9.20	1.84	77.82
	0.0180	36.82	7.36	70.46
	0.0131	36.82	7.36	63.10
	0.0109	27.61	5.52	57.58
	0.0078	36.82	7.36	50.22
	0.0057	9.20	1.84	48.38
	0.0042	82.84	16.56	31.83
	0.0031	32.22	6.44	25.39
	0.0020	19.33	3.86	21.52
	0.0013	25.77	5.15	16.37
	0.0009	14.73	2.94	13.43
	0.0007	2.76	0.55	12.88
	0.0006	23.01	4.60	8.28
	0.0005	5.52	1.10	7.17
	0.0004	9.20	1.84	3.50
Limo			71.79	
Arcilla			21.52	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)															
Datos de la muestra:				Suelo Contaminado											
Ubicación del sondeo:				Santa Rosa Jauregui											
Identificación del sondeo:				Repetición 3											
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007															
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>11:20</u> FECHA: <u>24-sep-18</u>			MATERIAL : Muestra: <u>B2</u> Ss = <u>2.73</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>93.62</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/lt Menisco (Cm) = <u>1</u> g/lt Fc α = <u>0.98</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/lt				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_d/W)x100$ $D = K(L/T)^{1/2}$					
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/lt).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm			
24-09-18		00:01	1	24.0	46.00	1.30	43.30	85%	79.66%	9.20	0.012640	0.0383			
24-09-18		00:02	2	24.0	45.00	1.30	42.30	83%	77.82%	9.40	0.012640	0.0274			
24-09-18		00:05	5	24.0	41.00	1.30	38.30	75%	70.46%	10.10	0.012640	0.0180			
24-09-18		00:10	10	24.0	37.00	1.30	34.30	67%	63.10%	10.70	0.012640	0.0131			
24-09-18		00:15	15	24.0	34.00	1.30	31.30	62%	57.58%	11.20	0.012640	0.0109			
24-09-18		00:30	30	24.0	30.00	1.30	27.30	54%	50.22%	11.40	0.012640	0.0078			
24-09-18		01:00	60	24.0	29.00	1.30	26.30	52%	48.38%	12.00	0.012640	0.0057			
24-09-18		02:00	120	24.0	20.00	1.30	17.30	34%	31.83%	13.50	0.012640	0.0042			
24-09-18		04:05	240	24.0	16.50	1.30	13.80	27%	25.39%	14.00	0.012640	0.0031			
24-09-18		09:25	570	25.0	14.00	1.70	11.70	23%	21.52%	14.30	0.012490	0.0020			
25-09-18		23:55	1440	23.0	12.00	0.90	8.90	17%	16.37%	14.80	0.012790	0.0013			
26-09-18		47:55	2880	24.0	10.00	1.30	7.30	14%	13.43%	15.20	0.012640	0.0009			
27-09-18		71:55	4320	24.5	9.50	1.50	7.00	14%	12.88%	15.20	0.012570	0.0007			
28-09-18		99:04	5948	24.5	7.00	1.50	4.50	9%	8.28%	15.55	0.012570	0.0006			
01-10-18		178:30	10723	23.0	7.00	0.90	3.90	8%	7.17%	15.60	0.012790	0.0005			
03-10-18		228:17	13601	23.0	5.00	0.90	1.90	4%	3.50%	16.00	0.012790	0.0004			



B.2.5 Límites de consistencia

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 1						
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	C	18.5200	156	28.2800	23.8700	4.4100	5.3500	82.43
2	D	18.6000	177	33.3400	26.6100	6.7300	8.0100	84.02
3	25	3.3200	229	16.1300	10.0700	6.0600	6.7500	89.78
4	21	3.3100	253	17.6800	10.9000	6.7800	7.5900	89.33
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)		Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	33	53.65		58.72	57.32	1.4	3.67	38.15
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₁	18.24	25.27	55.72	39.04	11.67	16.68	14.81
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	L _w =	86.16	I _p =
1	A	10.09	7.97867	2.11	20.95	L _p =	38.15	48.01
						L _s =	14.81	
						I _L =	20.95	
							Clasificación de finos	MH

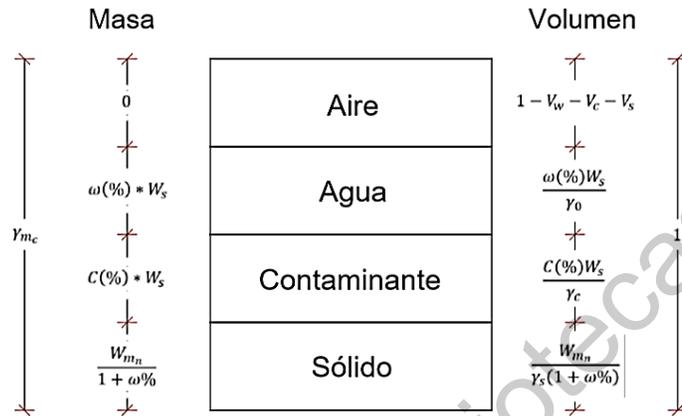
CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 2						
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	19	3.2900	173	12.4600	8.2600	4.2000	4.9700	84.51
2	B	24.1700	195	41.4500	33.5900	7.8600	9.4200	83.44
3	3	3.3300	223	11.4900	7.8900	3.6000	4.5600	78.95
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	37	53.66	58.67	57.3	1.37	3.64	37.64	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₂	17.48	26.04	55.82	38.58	11.92	17.24	14.79
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	L _w =	82.64	I _p =
1	B	10.14	8.02	2.12	20.90	L _p =	37.64	45.00
						L _s =	14.79	
						I _L =	20.90	
Clasificación de finos								MH
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Contaminado						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 3						
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	A	17.6500	140	32.9300	26.3000	6.6300	8.6500	76.65
2	10	3.3800	193	15.2900	9.8800	5.4100	6.5000	83.23
3	2	3.3900	219	19.1800	11.9100	7.2700	8.5200	85.33
4	27	3.3300	230	15.8700	10.0400	5.8300	6.7100	86.89
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	35	53.59	58.6	57.27	1.33	3.68	36.14	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₃	17.53	25.53	54.19	37.46	10.93	16.73	10.69
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	$L_w =$	83.13	$I_p =$
1	C	10.12	7.97	2.16	21.29	$L_p =$	36.14	46.99
						$L_s =$	10.69	
						$I_L =$	21.29	
Clasificación de finos								CH
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

B.3 Suelo tratado mediante Biopilas

B.3.1 Peso específico



$\omega := 0.1143$ contenido de agua
 $\gamma_w := 1$ densidad agua
 $c := .0287$ contenido de contaminante
 $\gamma_c := 0.832$ densidad contaminante
 $S_s := 2.47$ densidad relativa solidos
 $W_s = 1.131$
 γ_{mc} pesovolumetrico muestra contaminada

$$V_s := \frac{W_s}{S_s \cdot \gamma_w}$$

$$W_c := W_s \cdot c \quad V_c := \frac{W_c}{\gamma_c}$$

$$W_w := W_s \cdot \omega \quad V_w := \frac{W_w}{\gamma_w} \quad V_{mc} := 1$$

$$V_a := 1 - V_s - V_c - V_w \quad V_v := 1 - V_s \quad \gamma_{mc} := W_s + W_c + W_w$$

$$G_w := \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad e := \frac{V_v}{V_s} \quad n := \frac{V_v}{V_{mc}} \cdot 100$$

$G_w = 23.864$ $e = 1.183$ $n = 54.193$ $\gamma_{mc} = 1.293$

B.3.2 Contenido de líquidos

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE LÍQUIDOS								
Datos de la muestra:		Suelo Biopila						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		<u>Repetición 1, 2 Y 3</u>						
Datos del ensaye: ASTM D2216-10								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _ℓ (g)	ℓ %	$\bar{\ell}$ %
1	119.68	142.60	139.68	22.92	20.00	2.92	14.60	14.29
2	125.86	154.83	151.25	28.97	25.39	3.58	14.10	
3	120.78	143.26	140.47	22.48	19.69	2.79	14.17	
W _t : Peso de la tara; W _{mh} : Peso de la muestra húmeda; W _{ms} : Peso de la muestra seca; W _ℓ : Peso del agua ℓ(%): W _ℓ /W _s , contenido de líquidos								

Dirección General de Bibliotecas UAQ

B.3.3 Peso específico relativo de sólidos

Datos de la muestra:		Suelo Biopila				Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui				Horno: 110±5°C						
Identificación del sondeo:		Repetición 1										
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss	
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)			
Arena color negra	A	692.40	663.18	26.5	b	124.12	174.13	50.01	20.79	2.41	2.44	
Arena color negra	A	693.42	663.86	18.5	b	124.12	174.13	50.01	20.45	2.45		
Arena color negra	A	693.85	664.08	14.5	b	124.12	174.13	50.01	20.24	2.47		

Wfws: Peso (M+Ww+Ws) a t°
 Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración
 Wf: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración
 Wt: Peso de la tara
 Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos
 Ss: Ws/ (Vs γ_o), γ_o = 1 g/cm³

Temperatura (°C)	Wfw (g)
64.0	655.15
58.0	657.45
54.0	658.81
44.0	660.35
39.0	661.27
33.0	662.2
23.0	663.6
19.0	663.87
14.0	664.12

Calibración

$$y = -0.0026x^2 + 0.0314x + 664.17$$

$$R^2 = 0.9928$$

Datos de la muestra: Suelo Biopila				Datos del ensaye: ASTM D854-14																							
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>				Horno: <u>110±5°C</u>																							
Identificación del sondeo: <u>Repetición 2</u>																											
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss																
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)																		
Arena color negra	5	698.59	669.00	24.0	M	117.28	167.29	50.01	20.42	2.45	2.43																
Arena color negra	5	699.27	669.97	15.5	M	117.28	167.29	50.01	20.71	2.41																	
Arena color negra	5	699.81	670.29	12.0	M	117.28	167.29	50.01	20.49	2.44																	
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm ³																			
Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara																									
<table border="1" style="display: inline-table; margin-right: 20px;"> <caption>Calibración Matraz</caption> <thead> <tr> <th>Temperatura (°C)</th> <th>Wfw (g)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>56.0</td><td>663.02</td></tr> <tr><td>52.0</td><td>664.05</td></tr> <tr><td>42.0</td><td>666.2</td></tr> <tr><td>25.0</td><td>668.76</td></tr> <tr><td>20.0</td><td>669.55</td></tr> <tr><td>13.0</td><td>670.32</td></tr> <tr><td>7.0</td><td>670.61</td></tr> </tbody> </table> <div style="display: inline-block;"> </div>												Temperatura (°C)	Wfw (g)	56.0	663.02	52.0	664.05	42.0	666.2	25.0	668.76	20.0	669.55	13.0	670.32	7.0	670.61
Temperatura (°C)	Wfw (g)																										
56.0	663.02																										
52.0	664.05																										
42.0	666.2																										
25.0	668.76																										
20.0	669.55																										
13.0	670.32																										
7.0	670.61																										

Datos de la muestra: Suelo Biopila				Datos del ensaye: ASTM D854-14								
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>				Horno: <u>110±5°C</u>								
Identificación del sondeo: <u>Repetición 3</u>												
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss	
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)			
Arena color negra	5	699.06	668.74	26.0	0	124.98	174.99	50.01	19.69	2.54	2.53	
Arcilla color negra	5	699.91	669.60	19.0	0	124.98	174.99	50.01	19.70	2.54		
Arcilla color negra	5	700.13	670.06	14.5	0	124.98	174.99	50.01	19.94	2.51		
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm ³				
Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara										

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

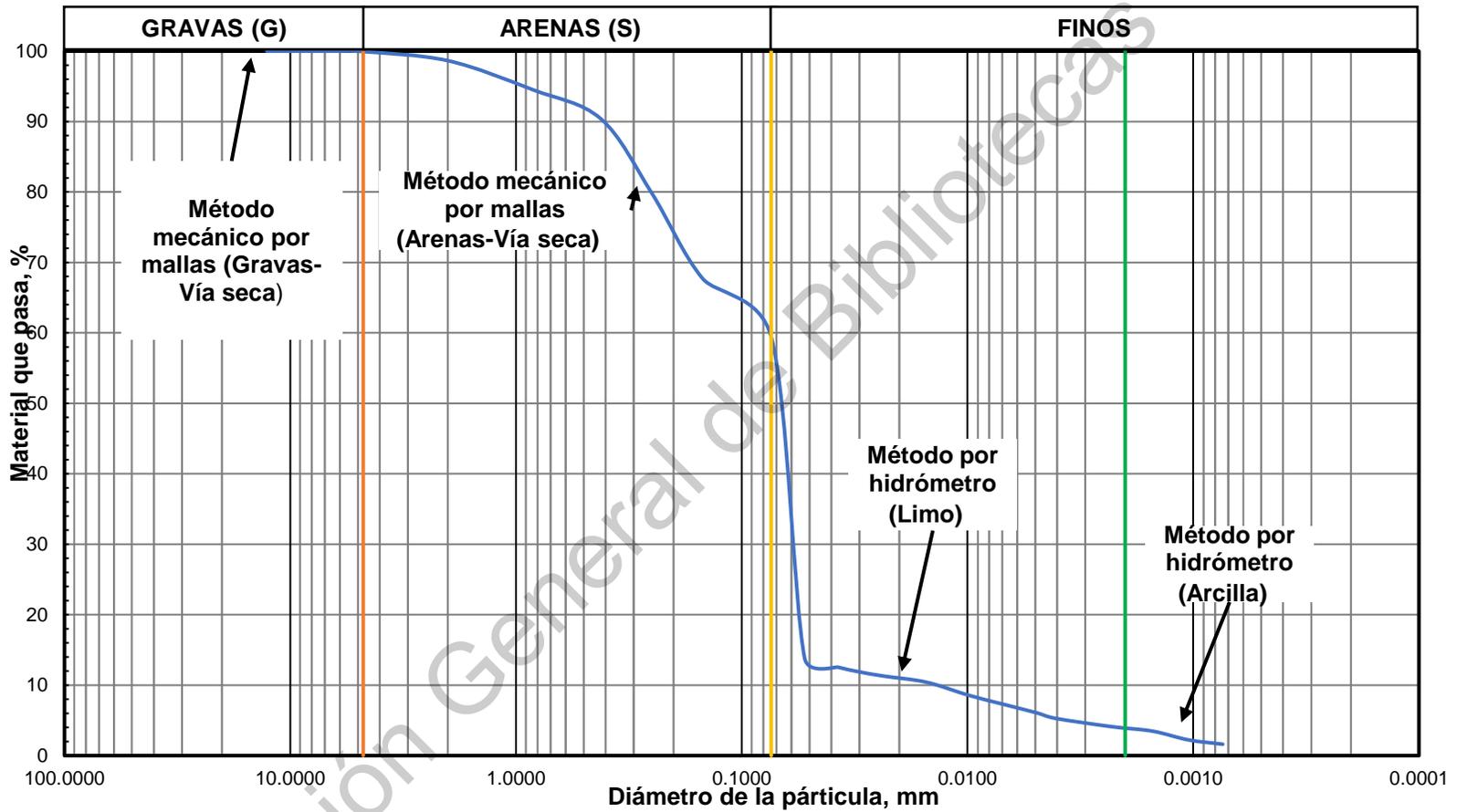
B.3.4 Granulometría

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Biopila		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 1		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		200.04 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.65	0.32	99.68
Grava		0.65	0.32	
Peso de la muestra para este ensayo:		199.39 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	2.00	1.00	98.68
No. 20	0.840	5.54	2.77	95.91
No. 40	0.420	22.48	11.24	84.67
No. 60	0.250	20.95	10.47	74.20
No. 100	0.149	20.32	10.16	64.04
No. 200	0.074	30.79	15.39	48.65
Arena		102.08	51.03	
Paso N°200 (Finos)		97.31		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0369	72.67	36.33	12.32
	0.0263	2.04	1.02	11.30
	0.0235	0.00	0.00	11.30
	0.0168	3.05	1.53	9.77
	0.0138	2.04	1.02	8.75
	0.0102	3.46	1.73	7.02
	0.0069	3.05	1.53	5.50
	0.0049	0.00	0.00	5.50
	0.0035	1.32	0.66	4.83
	0.0022	3.97	1.98	2.85
	0.0015	1.02	0.51	2.34
	0.0010	1.02	0.51	1.83
	0.0007	1.02	0.51	1.32
Limo			45.80	
Arcilla			2.85	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)															
Datos de la muestra:			Suelo Biopilas												
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui												
Identificación del sondeo:			Repetición 1												
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007															
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>12:19</u> FECHA: <u>31-ago-19</u>			MATERIAL : Muestra: <u>A2</u> Ss = <u>2.47</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>48.65</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/l Menisco (Cm) = <u>1</u> g/l Fc α = <u>1.05</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/l				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_a/W) \times 100$ $D = K(L/T)^{1/2}$					
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/l)	C _T (g/l)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/l).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm			
31-08-19		00:02	2	23.5	15.00	1.10	12.10	25%	12.32%	14.29	0.013822	0.0369			
31-08-19		00:04	4	23.5	14.00	1.10	11.10	23%	11.30%	14.48	0.013822	0.0263			
31-08-19		00:05	5	23.5	14.00	1.10	11.10	23%	11.30%	14.48	0.013822	0.0235			
31-08-19		00:10	10	23.5	12.50	1.10	9.60	20%	9.77%	14.74	0.013822	0.0168			
31-08-19		00:15	15	23.5	11.50	1.10	8.60	18%	8.75%	14.88	0.013822	0.0138			
31-08-19		00:28	28	23.0	10.00	0.90	6.90	14%	7.02%	15.21	0.013902	0.0102			
31-08-19		01:02	62	23.0	8.50	0.90	5.40	11%	5.50%	15.42	0.013902	0.0069			
31-08-19		02:04	124	23.0	8.50	0.90	5.40	11%	5.50%	15.42	0.013902	0.0049			
31-08-19		04:07	247	22.5	8.00	0.75	4.75	10%	4.83%	15.53	0.013984	0.0035			
31-08-19		10:37	637	21.0	6.50	0.30	2.80	6%	2.85%	15.84	0.014236	0.0022			
01-09-19		23:47	1427	21.0	6.00	0.30	2.30	5%	2.34%	15.94	0.014236	0.0015			
02-09-19		49:15	2955	21.0	5.50	0.30	1.80	4%	1.83%	16.02	0.014236	0.0010			
04-09-19		99:03	5943	21.0	5.00	0.30	1.30	3%	1.32%	16.07	0.014236	0.0007			

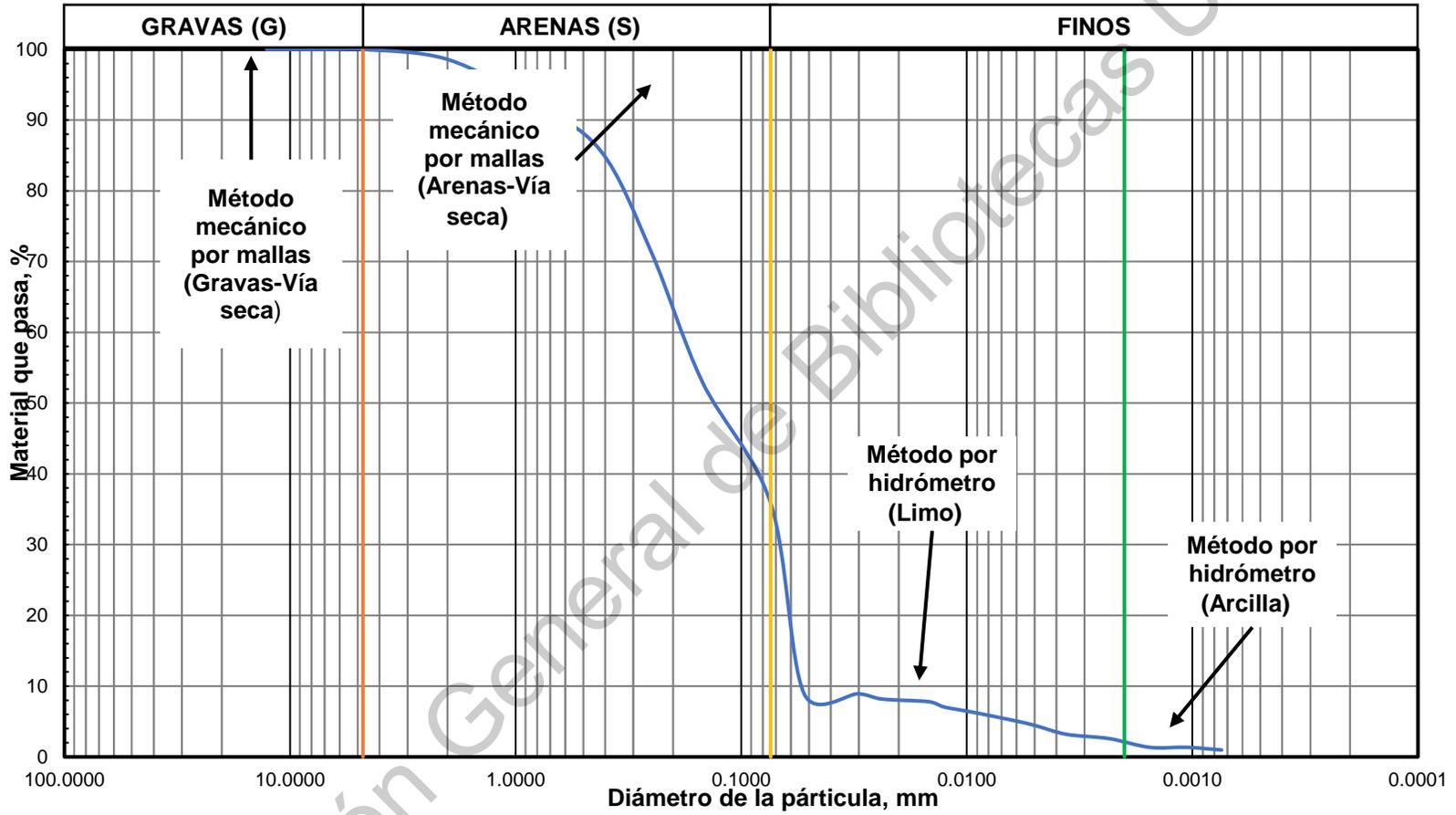
DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Biopila		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 2		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		200.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.14	0.07	99.93
Grava		0.14	0.07	
Peso de la muestra para este ensayo:		199.86 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	2.58	1.29	98.64
No. 20	0.840	8.26	4.13	94.51
No. 40	0.420	8.28	4.14	90.37
No. 60	0.250	21.10	10.55	79.82
No. 100	0.149	24.19	12.10	67.73
No. 200	0.074	16.60	8.30	59.43
Arena		81.01	40.51	
Paso N°200 (Finos)		118.85		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0526	91.25	45.62	13.80
	0.0374	2.49	1.24	12.56
	0.0306	1.24	0.62	11.94
	0.0238	1.24	0.62	11.32
	0.0169	1.24	0.62	10.69
	0.0138	1.24	0.62	10.07
	0.0099	2.98	1.49	8.58
	0.0070	2.49	1.24	7.34
	0.0050	2.49	1.24	6.09
	0.0041	1.62	0.81	5.28
	0.0023	2.36	1.18	4.10
	0.0015	1.24	0.62	3.48
	0.0011	2.49	1.24	2.24
	0.0007	1.24	0.62	1.62
Limo			55.32	
Arcilla			4.10	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)												
Datos de la muestra:			Suelo Biopilas									
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui									
Identificación del sondeo:			Repetición 2									
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007												
AGENTE DISPERSOR : Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>12:39</u> FECHA: <u>31-ago-19</u>			MATERIAL : Ss = <u>2.47</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>59.43</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Menisco (Cm) = <u>1</u> g/lt Fc α = <u>1.05</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/lt			HIDRÓMETRO : $P = (R_a/W)x100$ $D = K(L/T)^{1/2}$			
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/lt).	Phid / Pmec %	Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm	
31-08-19		00:01	1	23.5	14.00	1.10	11.10	23% 13.80%	14.48	0.013822	0.0526	
31-08-19		00:02	2	23.5	13.00	1.10	10.10	21% 12.56%	14.68	0.013822	0.0374	
31-08-19		00:03	3	23.5	12.50	1.10	9.60	20% 11.94%	14.74	0.013822	0.0306	
31-08-19		00:05	5	23.5	12.00	1.10	9.10	19% 11.32%	14.79	0.013822	0.0238	
31-08-19		00:10	10	23.5	11.50	1.10	8.60	18% 10.69%	14.88	0.013822	0.0169	
31-08-19		00:15	15	23.5	11.00	1.10	8.10	17% 10.07%	14.98	0.013822	0.0138	
31-08-19		00:30	30	23.0	10.00	0.90	6.90	14% 8.58%	15.21	0.013902	0.0099	
31-08-19		01:00	60	23.0	9.00	0.90	5.90	12% 7.34%	15.32	0.013902	0.0070	
31-08-19		02:02	122	23.0	8.00	0.90	4.90	10% 6.09%	15.51	0.013902	0.0050	
31-08-19		04:04	184	22.5	7.50	0.75	4.25	9% 5.28%	15.58	0.013984	0.0041	
31-08-19		10:11	611	21.0	7.00	0.30	3.30	7% 4.10%	15.74	0.014236	0.0023	
01-09-19		23:15	1395	21.0	6.50	0.30	2.80	6% 3.48%	15.84	0.014236	0.0015	
02-09-19		48:56	2936	21.0	5.50	0.30	1.80	4% 2.24%	16.02	0.014236	0.0011	
04-09-19		99:17	5957	21.0	5.00	0.30	1.30	3% 1.62%	16.07	0.014236	0.0007	



DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Biopila		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 3		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		219.77 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75	0.00	0.00	100.00
Grava		0.00	0.00	
Peso de la muestra para este ensayo:		219.77 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	3.15	1.43	98.57
No. 20	0.840	13.38	6.09	92.48
No. 40	0.420	14.97	6.81	85.67
No. 60	0.250	31.58	14.37	71.30
No. 100	0.149	40.06	18.23	53.07
No. 200	0.074	37.88	17.24	35.83
Arena		141.02	64.17	
Paso N°200 (Finos)		78.75		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0526	59.14	26.91	8.92
	0.0304	0.00	0.00	8.92
	0.0237	1.65	0.75	8.17
	0.0147	0.82	0.37	7.80
	0.0126	1.65	0.75	7.05
	0.0093	1.65	0.75	6.30
	0.0063	2.47	1.12	5.17
	0.0050	1.65	0.75	4.42
	0.0036	2.72	1.24	3.19
	0.0023	1.32	0.60	2.59
	0.0015	2.72	1.24	1.35
	0.0011	0.00	0.00	1.35
	0.0007	0.82	0.37	0.97
Limo			33.24	
Arcilla			2.59	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)												
Datos de la muestra:				Suelo Biopilas								
Ubicación del sondeo:				Santa Rosa Jauregui								
Identificación del sondeo:				Repetición 3								
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007												
AGENTE DISPERSOR :			MATERIAL :			FACTORES DE CORRECCIÓN :			HIDRÓMETRO :			
Cantidad = 5 %			Ss = 2.47			Menisco (Cm) = 1 g/lt			$P = (R_a/W) \times 100$ $D = K(L/T)^{1/2}$			
HORA DE INICIO: 13:29			W muestra = 50 g			Fc = 1.05						
FECHA: 31-ago-19			Finos = 35.83 %			Defloculante (Cd) = -5 g/lt						
Malla No. = 200												
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c (g/lt)	Phid / Pmec %	Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm	
31-08-19		00:01	1	23.0	15.00	0.90	11.90	25% 8.92%	14.32	0.013902	0.0526	
31-08-19		00:03	3	23.0	15.00	0.90	11.90	25% 8.92%	14.32	0.013902	0.0304	
31-08-19		00:05	5	23.0	14.00	0.90	10.90	23% 8.17%	14.52	0.013902	0.0237	
31-08-19		00:13	13	23.0	13.50	0.90	10.40	22% 7.80%	14.62	0.013902	0.0147	
31-08-19		00:18	18	23.0	12.50	0.90	9.40	20% 7.05%	14.76	0.013902	0.0126	
31-08-19		00:33	33	23.0	11.50	0.90	8.40	18% 6.30%	14.92	0.013902	0.0093	
31-08-19		01:15	75	23.0	10.00	0.90	6.90	14% 5.17%	15.21	0.013902	0.0063	
31-08-19		02:00	120	23.0	9.00	0.90	5.90	12% 4.42%	15.28	0.013902	0.0050	
31-08-19		03:50	230	22.5	7.50	0.75	4.25	9% 3.19%	15.35	0.013984	0.0036	
31-08-19		09:35	575	21.5	7.00	0.45	3.45	7% 2.59%	15.71	0.014151	0.0023	
01-09-19		22:38	1358	21.0	5.50	0.30	1.80	4% 1.35%	16.02	0.014236	0.0015	
02-09-19		48:07	2887	21.0	5.50	0.30	1.80	4% 1.35%	16.02	0.014236	0.0011	
04-09-19		98:29	5909	21.0	5.00	0.30	1.30	3% 0.97%	16.07	0.014236	0.0007	



B.3.5 Límites de consistencia

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Biopilas						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 1						
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	3	3.3526	169	16.6323	10.4600	6.1723	7.1074	86.84
2	2	3.3978	198	16.9918	10.6300	6.3618	7.2322	87.96
3	19c	3.3063	213	17.1000	10.5800	6.5200	7.2737	89.64
4	27	3.3349	225	19.1111	11.5800	7.5311	8.2451	91.34
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	1	58.5907	64.5660	63.1100	1.4560	4.5193	32.22	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₁	17.23	26.63	54.976	37.17	12.95	17.0206	20.69
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	$L_w =$	89.33	$I_p =$
1	1	9.89	8.05	1.84	18.60	$L_p =$	32.22	57.11
						$L_s =$	20.69	
						$I_L =$	18.60	
Clasificación de finos								CH
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:			Suelo Biopilas					
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui					
Identificación del sondeo:			Repetición 2					
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	10c	3.3902	170	22.2701	13.2600	9.0101	9.8698	91.29
2	21	3.3216	185	14.4018	9.0900	5.3118	5.7684	92.08
3	25	3.3206	211	15.7769	9.7700	6.0069	6.4494	93.14
4	5	3.3593	243	23.2903	13.4700	9.8203	10.1107	97.13
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	2	100.49	113.269	109.2400	4.029	8.75	46.05	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₂	16.93	26.3	53.8775	36.01	12.16	17.8675	19.54
Índice de Contracción Lineal (IL)					Resultados			
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	L _w =	93.6	I _p =
1	2	10.08	8.06	2.02	20.04	L _p =	46.05	47.55
						L _s =	19.54	
						I _L =	20.04	

CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS

Contenido de agua en %

Penetración en mm

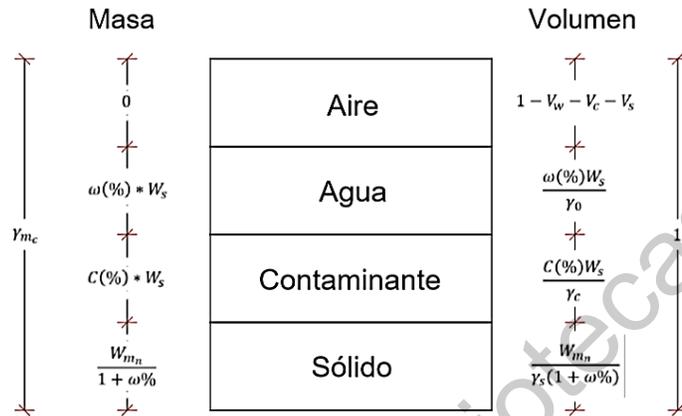
Índice de plasticidad, Ip, %

Límite Líquido, Lw, %

LIMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:			Suelo Biopilas					
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui					
Identificación del sondeo:			Repetición 3					
Datos del ensaye: BS 1377-2:1990/ASTM D4318 2017								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	SN	1.0701	186	18.4608	10.2800	8.1808	9.2099	88.83
2	Alum	12.5224	196	26.6089	19.9800	6.6289	7.4576	88.89
3	Flan	125.8652	211	151.5433	139.3200	12.2233	13.4548	90.85
4	Flor	12.8391	226	35.6075	24.6300	10.9775	11.7909	93.10
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	3	101.0361	111.2149	107.9900	3.2249	6.9539	46.38	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₃	18.12	27.33	57.4204	39.0800	13.41	18.3404	21.09
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	$L_w =$	89.47	$I_p =$
1	C	10.14	8.26	1.88	18.54	$L_p =$	46.38	43.09
						$L_s =$	21.09	
						$I_L =$	18.54	
Clasificación de finos							MH	
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

B.4 Suelo tratado mediante atenuación natural

B.4.1 Peso específico



$\omega := 0.0981$ contenido de agua
 $\gamma_w := 1$ densidad agua
 $c := .0533$ contenido de contaminante
 $\gamma_c := 0.832$ densidad contaminante
 $S_s := 2.53$ densidad relativa solidos
 $W_s := 1.131$
 γ_{mc} pesovolumetrico muestra contaminada

$$V_s := \frac{W_s}{S_s \cdot \gamma_w}$$

$$W_c := W_s \cdot c \quad V_c := \frac{W_c}{\gamma_c} \quad V_{mc} := 1$$

$$W_w := W_s \cdot \omega \quad V_w := \frac{W_w}{\gamma_w} \quad \gamma_{mc} := W_s + W_c + W_w$$

$$V_a := 1 - V_s - V_c - V_w \quad V_v := 1 - V_s \quad G_w := \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad e := \frac{V_v}{V_s} \quad n := \frac{V_v}{V_{mc}} \cdot 100$$

$G_w = 20.079$ $e = 1.236$ $n = 55.279$ $\gamma_{mc} = 1.303$

B.4.2 Contenido de líquidos

DETERMINACIÓN DEL COTENIDO DE LÍQUIDOS								
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural						
Ubicación del sondeo:		<u>Santa Rosa Jauregui</u>						
Identificación del sondeo:		<u>Repetición 1, 2 Y 3</u>						
Datos del ensaye: ASTM D2216-10								
N°	W _t (g)	W _{t+mh} (g)	W _{t+ms} (g)	W _{mh} (g)	W _{ms} (g)	W _ℓ (g)	ℓ	$\bar{\rho}$ %
1	12.32	72.34	64.87	60.02	52.55	7.47	14.22	15.14
2	12.76	66.54	59.45	53.78	46.69	7.09	15.19	
3	24.50	79.62	72.01	55.12	47.51	7.61	16.02	
W _t : Peso de la tara; W _{mh} : Peso de la muestra húmeda; W _{ms} : Peso de la muestra seca; W _ℓ : Peso del agua ℓ(%): W _ℓ /W _s , contenido de líquidos								

Dirección General de Bibliotecas UJAO

B.4.3 Peso específico relativo de sólidos

Datos de la muestra: Suelo Atenuación Natural					Datos del ensaye: ASTM D854-14							
Ubicación del sondeo: Santa Rosa Jauregui					Horno: 110±5°C							
Identificación del sondeo: <u>Repetición 1</u>												
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss	
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)			
Arena color negra	5	698.46	669.00	24.0	b	124.12	173.09	48.97	19.51	2.51	2.52	
Arena color negra	5	698.89	669.49	20.0	b	124.12	173.09	48.97	19.57	2.50		
Arena color negra	5	699.71	670.02	15.0	b	124.12	173.09	48.97	19.28	2.54		
Wfws: Peso (M+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm ³				
Wfw: Peso (M+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara										

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

Datos de la muestra: Suelo Atenuación Natural					Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>110±5°C</u>						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 2</u>											
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)		
Arena color negra	5	698.59	669.00	24.0	M	117.28	165.98	48.70	19.11	2.55	2.54
Arena color negra	5	699.27	669.60	19.0	M	117.28	165.98	48.70	19.03	2.56	
Arena color negra	5	699.81	670.45	10.0	M	117.28	165.98	48.70	19.34	2.52	
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm ³			
Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración		Wt: Peso de la tara									

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

Datos de la muestra: Suelo Atenuación Natural					Datos del ensaye: ASTM D854-14						
Ubicación del sondeo: <u>Santa Rosa Jauregui</u>					Horno: <u>110±5°C</u>						
Identificación del sondeo: <u>Repetición 3</u>											
Descripción de la muestra	Matraz	WMws	WMw	Temp. Promedio	Tara	Wt	Wt + Ws	Ws	Vs	Ss	Ss
	No.	(g)	(g)	°C	No.	(g)	(g)	(g)	(cm ³)		
Arena color negra	5	699.46	669.00	24.0	0	124.98	175.22	50.24	19.78	2.54	2.54
Arcilla color negra	5	700.00	669.49	20.0	0	124.98	175.22	50.24	19.73	2.55	
Arcilla color negra	5	700.42	670.02	15.0	0	124.98	175.22	50.24	19.84	2.53	
Wfws: Peso (f+Ww+Ws) a t°		Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración			Wt: Peso de la tara			Ws: Peso del suelo; Vs: Volumen de sólidos			
Wfw: Peso (f+ Ww) a t° de la curva de calibración								Ss: Ws/ (Vs γ ₀), γ ₀ = 1 g/cm ³			

Temperatura (°C)	Wfw (g)
56.0	663.02
52.0	664.05
42.0	666.2
25.0	668.76
20.0	669.55
13.0	670.32
7.0	670.61

Calibración

$y = -0.0019x^2 - 0.0384x + 671.02$
 $R^2 = 0.9992$

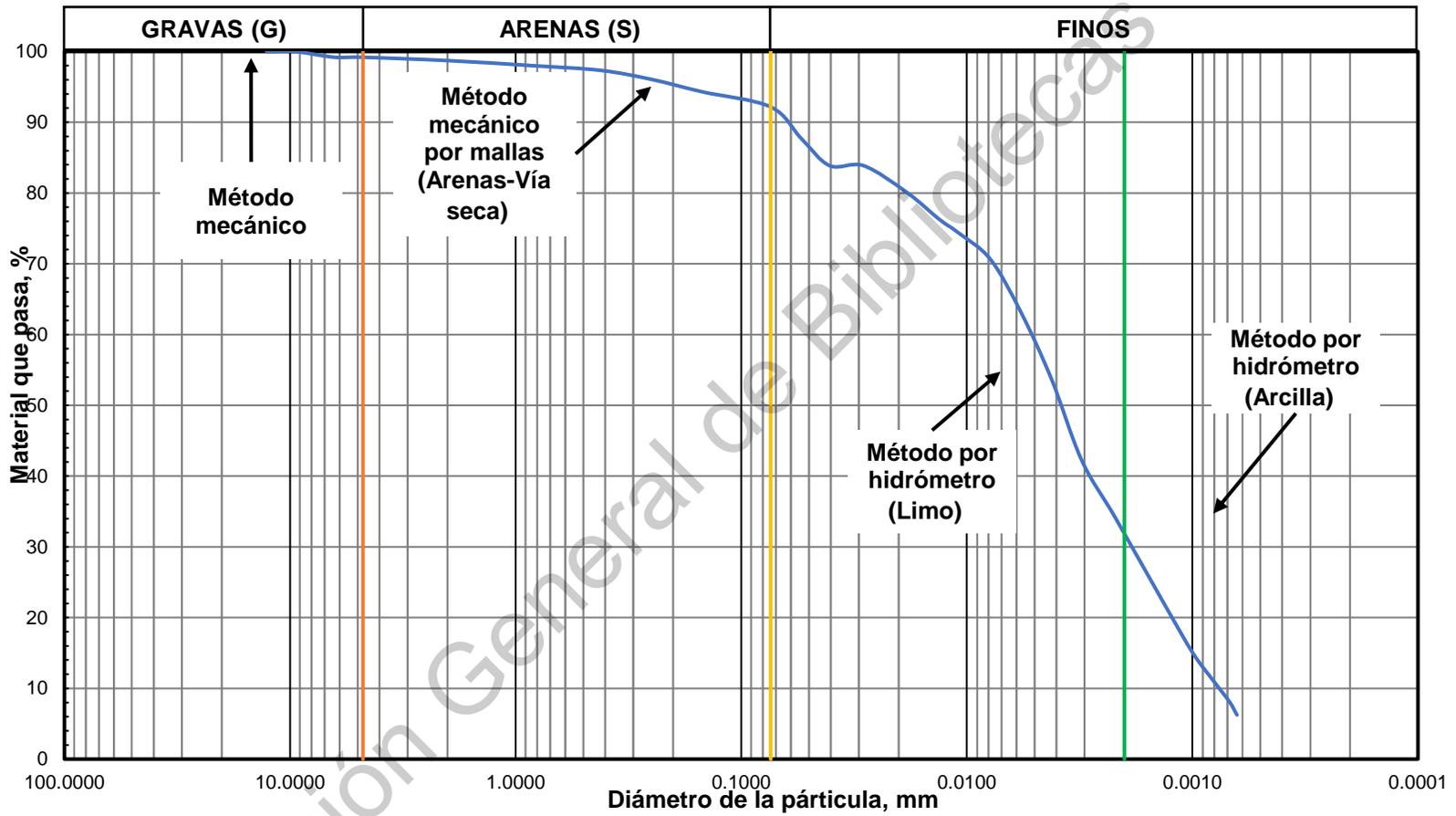
B.4.4 Granulometría

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 1		
Datos del ensaye: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		214.20 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	2.05	0.96	99.04
No. 4	4.75	0.00	0.00	99.04
Grava		2.05	0.96	
Peso de la muestra para este ensayo:		212.15 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	0.74	0.35	98.70
No. 20	0.840	1.56	0.73	97.97
No. 40	0.420	1.44	0.67	97.30
No. 60	0.250	2.63	1.23	96.07
No. 100	0.149	3.61	1.69	94.38
No. 200	0.074	4.87	2.27	92.11
Arena		14.85	6.93	
Paso N°200 (Finos)		197.30		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0394	5.62	2.63	89.48
	0.0284	8.10	3.78	85.70
	0.0181	4.05	1.89	83.81
	0.0134	20.26	9.46	74.35
	0.0110	4.05	1.89	72.46
	0.0079	8.10	3.78	68.67
	0.0058	16.21	7.57	61.11
	0.0042	16.21	7.57	53.54
	0.0030	12.16	5.68	47.86
	0.0021	13.37	6.24	41.62
	0.0013	27.15	12.68	28.95
	0.0013	21.88	10.22	18.73
	0.0008	12.16	5.68	13.05
	0.0007	14.59	6.81	6.24
	0.0006	0.00	0.00	6.24
Limo			50.49	
Arcilla			41.62	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)															
Datos de la muestra:			Suelo Atenuación Natural												
Ubicación del sondeo:			Santa Rosa Jauregui												
Identificación del sondeo:			Repetición 1												
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007															
AGENTE DISPERSOR : Tipo = <u>NaPO₆</u> Cantidad = <u>5</u> % HORA DE INICIO: <u>12:15</u> FECHA: <u>12-abr-19</u>			MATERIAL : Muestra: <u>A2</u> Ss = <u>2.54</u> W muestra = <u>50</u> g Finos= <u>92.11</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Cero (Cc)= <u>0</u> g/lt Menisco (Cm) = <u>1</u> g/lt Fc α = <u>1.03</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/lt				HIDRÓMETRO : Tipo = <u>152H</u> $P = (R_a/W) \times 100$ $D = K(L/T)^{1/2}$					
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c (g/lt).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm			
12-04-19		00:01	1	24.0	50.00	1.30	47.30	97%	89.48%	8.54	0.013474	0.0394			
12-04-19		00:02	2	24.0	48.00	1.30	45.30	93%	85.70%	8.87	0.013474	0.0284			
12-04-19		00:05	5	24.0	47.00	1.30	44.30	91%	83.81%	9.04	0.013474	0.0181			
12-04-19		00:10	10	24.0	42.00	1.30	39.30	81%	74.35%	9.84	0.013474	0.0134			
12-04-19		00:15	15	24.0	41.00	1.30	38.30	79%	72.46%	10.07	0.013474	0.0110			
12-04-19		00:30	30	24.0	39.00	1.30	36.30	75%	68.67%	10.34	0.013474	0.0079			
12-04-19		01:00	60	24.0	35.00	1.30	32.30	66%	61.11%	11.04	0.013474	0.0058			
12-04-19		02:00	120	24.0	31.00	1.30	28.30	58%	53.54%	11.64	0.013474	0.0042			
12-04-19		04:00	240	24.0	28.00	1.30	25.30	52%	47.86%	12.14	0.013474	0.0030			
12-04-19		08:04	484	26.0	24.00	2.00	22.00	45%	41.62%	12.70	0.013164	0.0021			
13-04-19		25:54	1554	24.0	18.00	1.30	15.30	31%	28.95%	13.77	0.013474	0.0013			
14-04-19		47:15	1554	23.0	13.00	0.90	9.90	20%	18.73%	14.71	0.013626	0.0013			
15-04-19		72:07	4327	23.0	10.00	0.90	6.90	14%	13.05%	15.21	0.013626	0.0008			
16-04-19		100:00	6000	24.0	6.00	1.30	3.30	7%	6.24%	15.74	0.013474	0.0007			
17-04-19		118:25	7105	24.0	6.00	1.30	3.30	7%	6.24%	15.74	0.013474	0.0006			

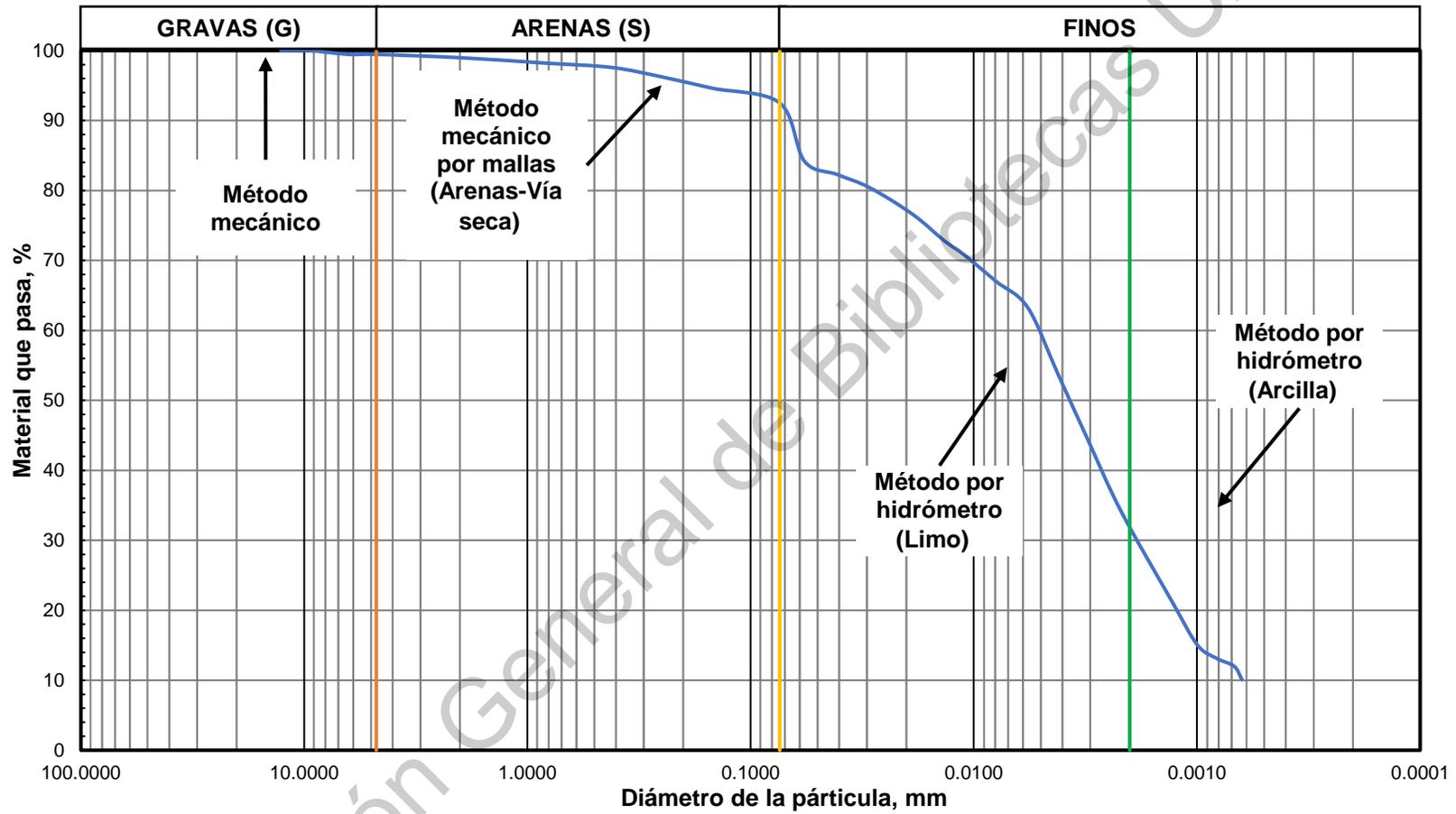
DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 2		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		200.43 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	1.63	0.81	99.19
No. 4	4.75	0.00	0.00	99.19
Grava		1.63	0.81	
Peso de la muestra para este ensayo:		198.80 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	0.94	0.47	98.72
No. 20	0.840	1.44	0.72	98.00
No. 40	0.420	1.33	0.66	97.34
No. 60	0.250	2.55	1.27	96.06
No. 100	0.149	3.52	1.76	94.31
No. 200	0.074	4.29	2.14	92.17
Arena		14.07	7.02	
Paso N°200 (Finos)		184.73		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0540	9.06	4.52	87.65
	0.0405	7.59	3.79	83.86
	0.0286	0.00	0.00	83.86
	0.0184	7.59	3.79	80.07
	0.0132	7.59	3.79	76.29
	0.0109	3.79	1.89	74.40
	0.0078	7.59	3.79	70.61
	0.0057	15.18	7.57	63.04
	0.0042	18.97	9.47	53.57
	0.0031	22.77	11.36	42.21
	0.0022	16.31	8.14	34.07
	0.0013	25.42	12.68	21.39
	0.0010	12.90	6.44	14.95
	0.0008	7.59	3.79	11.17
	0.0007	6.07	3.03	8.14
	0.0006	3.79	1.89	6.25
Limo			58.09	
Arcilla			34.07	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)												
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural										
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui										
Identificación del sondeo:		Repetición 2										
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007												
AGENTE DISPERSOR : Cantidad = <u>5</u> %			MATERIAL : Ss = <u>2.54</u> W muestra = <u>50</u> g Finos = <u>92.17</u> % Malla No. = <u>200</u>			FACTORES DE CORRECCIÓN : Menisco (Cm) = <u>1</u> g/lt Fc α = <u>1.03</u> Defloculante (Cd) = <u>-5</u> g/lt			HIDRÓMETRO : $P = (R_a/W)x100$ $D = K(L/T)^{1/2}$			
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/lt)	C _T (g/lt)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c , (g/lt).	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm
12-04-19		00:00:30	0.5	24.0	49.00	1.30	46.30	95%	87.65%	8.02	0.013474	0.0540
12-04-19		00:01	1	24.0	47.00	1.30	44.30	91%	83.86%	9.04	0.013474	0.0405
12-04-19		00:02	2	24.0	47.00	1.30	44.30	91%	83.86%	9.04	0.013474	0.0286
12-04-19		00:05	5	24.0	45.00	1.30	42.30	87%	80.07%	9.34	0.013474	0.0184
12-04-19		00:10	10	24.0	43.00	1.30	40.30	83%	76.29%	9.67	0.013474	0.0132
12-04-19		00:15	15	24.0	42.00	1.30	39.30	81%	74.40%	9.84	0.013474	0.0109
12-04-19		00:30	30	24.0	40.00	1.30	37.30	77%	70.61%	10.17	0.013474	0.0078
12-04-19		01:00	60	24.0	36.00	1.30	33.30	68%	63.04%	10.84	0.013474	0.0057
12-04-19		02:00	120	24.0	31.00	1.30	28.30	58%	53.57%	11.64	0.013474	0.0042
12-04-19		04:00	240	24.0	25.00	1.30	22.30	46%	42.21%	12.64	0.013474	0.0031
12-04-19		08:00	480	26.0	20.00	2.00	18.00	37%	34.07%	13.30	0.013164	0.0022
13-04-19		25:48	1548	24.0	14.00	1.30	11.30	23%	21.39%	14.47	0.013474	0.0013
14-04-19		47:09	2829	23.0	11.00	0.90	7.90	16%	14.95%	15.02	0.013626	0.0010
15-04-19		72:00	4320	23.0	9.00	0.90	5.90	12%	11.17%	15.32	0.013626	0.0008
16-04-19		99:57	5997	24.0	7.00	1.30	4.30	9%	8.14%	15.54	0.013474	0.0007
17-04-19		118:20	7100	24.0	6.00	1.30	3.30	7%	6.25%	15.74	0.013474	0.0006



DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA				
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural		
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui		
Identificación del sondeo:		Repetición 3		
Datos del ensayo: ASTM D 6913/6913M 2017				
Peso total de la muestra para la prueba (g)		202.04 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
1/2 "	12.70	0.00	0.00	100.00
3/8 "	9.52	0.00	0.00	100.00
1/4 "	6.35	1.10	0.54	99.46
No. 4	4.75	0.00	0.00	99.46
Grava		1.10	0.54	
Peso de la muestra para este ensayo:		200.94 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
No. 10	2.000	0.97	0.48	98.98
No. 20	0.840	1.53	0.76	98.22
No. 40	0.420	1.28	0.63	97.59
No. 60	0.250	2.73	1.35	96.24
No. 100	0.149	3.26	1.61	94.63
No. 200	0.074	4.28	2.12	92.51
Arena		14.05	6.95	
Paso N°200 (Finos)		186.89		
Peso de la muestra para este ensayo:		50.00 g		
Malla tipo	Diámetro (mm)	Material retenido (g)	Material retenido (%)	Material que pasa (%)
	0.0573	16.84	8.34	84.17
	0.0408	3.84	1.90	82.27
	0.0291	3.84	1.90	80.37
	0.0187	7.68	3.80	76.57
	0.0135	7.68	3.80	72.77
	0.0111	3.84	1.90	70.87
	0.0080	7.68	3.80	67.07
	0.0057	7.68	3.80	63.27
	0.0042	19.19	9.50	53.77
	0.0031	19.19	9.50	44.27
	0.0022	20.35	10.07	34.20
	0.0013	25.72	12.73	21.47
	0.0010	13.05	6.46	15.01
	0.0008	3.84	1.90	13.11
	0.0007	2.30	1.14	11.97
	0.0006	3.84	1.90	10.07
Limo			58.31	
Arcilla			34.20	

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA (HIDRÓMETRO)												
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural										
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui										
Identificación del sondeo:		Repetición 3										
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 2007												
AGENTE DISPERSOR :			MATERIAL : -				FACTORES DE CORRECCIÓN :			HIDRÓMETRO :		
HORA DE INICIO: 12:28			W muestra = 50 g				Fc α = 1.03			$D = K(L/T)^{1/2}$		
FECHA: 12-abr-19			Finos= 92.51 %				Defloculante (Cd) = -5 g/l					
Malla No. = 200												
Fecha	Hora de lectura	Tiempo transcurrido, hrs	Tiempo transcurrido, min	Temperatura, °C	Lectura actual del Hidrómetro, R _H (g/l)	C _T (g/l)	Lectura corregida del Hidrómetro, R _c (g/l)	Phid / Pmec %		Hr (cm)	K mm (min/cm) ^{1/2}	D mm
12-04-19		00:00:30	0.5	24.0	47.00	1.30	44.30	91%	84.17%	9.04	0.013474	0.0573
12-04-19		00:01	1	24.0	46.00	1.30	43.30	89%	82.27%	9.17	0.013474	0.0408
12-04-19		00:02	2	24.0	45.00	1.30	42.30	87%	80.37%	9.34	0.013474	0.0291
12-04-19		00:05	5	24.0	43.00	1.30	40.30	83%	76.57%	9.67	0.013474	0.0187
12-04-19		00:10	10	24.0	41.00	1.30	38.30	79%	72.77%	10.04	0.013474	0.0135
12-04-19		00:15	15	24.0	40.00	1.30	37.30	77%	70.87%	10.17	0.013474	0.0111
12-04-19		00:30	30	24.0	38.00	1.30	35.30	73%	67.07%	10.54	0.013474	0.0080
12-04-19		01:00	60	24.0	36.00	1.30	33.30	68%	63.27%	10.84	0.013474	0.0057
12-04-19		02:00	120	24.0	31.00	1.30	28.30	58%	53.77%	11.64	0.013474	0.0042
12-04-19		04:00	240	24.0	26.00	1.30	23.30	48%	44.27%	12.47	0.013474	0.0031
12-04-19		08:00	480	26.0	20.00	2.00	18.00	37%	34.20%	13.30	0.013164	0.0022
13-04-19		25:43	1543	24.0	14.00	1.30	11.30	23%	21.47%	14.47	0.013474	0.0013
14-04-19		47:04	2824	23.0	11.00	0.90	7.90	16%	15.01%	15.02	0.013626	0.0010
15-04-19		71:55	4265	23.0	10.00	0.90	6.90	14%	13.11%	15.21	0.013626	0.0008
16-04-19		99:51	5991	24.0	9.00	1.30	6.30	13%	11.97%	15.24	0.013474	0.0007
17-04-19		118:14	7094	24.0	8.00	1.30	5.30	11%	10.07%	15.44	0.013474	0.0006



B.4.5 Límites de consistencia

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 1						
Datos del ensayo: ASTM D 422 - 63 R02								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	27	3.3308	145	11.0092	7.3900	3.6192	4.0592	89.16
2	3	3.3505	166	10.4009	7.0400	3.3609	3.6895	91.09
3	25	3.3162	205	18.3378	11.1400	7.1978	7.8238	92.00
4	5	3.3561	238	13.8518	8.7900	5.0618	5.4339	93.15
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	1	53.5975	61.4210	58.8000	2.6210	5.2025	50.38	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₁	18.12	26.92	56.4891	38.03	11.35	18.4591	14.51
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	<i>L_w</i> =	91.96	<i>I_p</i> =
1		10.09	8.15	1.94	19.23	<i>L_p</i> =	50.38	41.58
						<i>L_s</i> =	14.51	
						<i>I_L</i> =	19.23	
							Clasificación de finos	MH
CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS 								

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 2						
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 R02								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	A	1.0704	182	9.8616	5.7400	4.1216	4.6696	88.26
2	B	17.6508	195	23.9032	20.9800	2.9232	3.3292	87.80
3	C	12.5790	203	20.7004	16.8800	3.8204	4.3010	88.83
4	D	24.3073	220	34.5831	29.7000	4.8831	5.3927	90.55
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	2	53.643	63.0903	60.1700	2.9203	6.527	44.74	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₂	17.54	25.33	53.5924	36.69	11.23	16.9024	14.63
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	<i>L_w</i> =	88.17	<i>I_p</i> =
						<i>L_p</i> =	44.74	43.43
1	B	10.14	8.08	2.06	20.32	<i>L_s</i> =	14.63	
						<i>I_L</i> =	20.32	
							Clasificación de finos	MH
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

LÍMITES DE CONSISTENCIA								
Datos de la muestra:		Suelo Atenuación Natural						
Ubicación del sondeo:		Santa Rosa Jauregui						
Identificación del sondeo:		Repetición 3						
Datos del ensaye: ASTM D 422 - 63 R02								
Límite Líquido (LL)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Penet. (mm)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)
1	21	3.3201	140	9.8464	6.8700	2.9764	3.5499	83.84
2	19 _c	3.3053	187	17.5908	10.8000	6.7908	7.4947	90.61
3	2	3.3981	210	25.0311	14.6800	10.3511	11.2819	91.75
4	20 _c	3.3876	225	24.6713	14.4300	10.2413	11.0424	92.75
Límite Plástico (LP)								
No.	Tara	Peso de tara (grs)	Tara + Suelo H. (grs)	Tara + Suelo S. (grs)	Peso de agua (grs)	Peso de Suelo S. (grs)	Contenido de agua (%)	
1	3	58.4572	68.0238	65.0600	2.9638	6.6028	44.89	
Límite de Contracción Volumétrica (LC)								
No.	Capsula	Peso capsula (grs)	Volumen inicial (cm ³)	Capsula + Suelo H. (grs)	Capsula + Suelo S. (grs)	Volumen Final (cm ³)	Peso de agua (grs)	LC (%)
1	CV ₃	17.48	26.04	54.2641	36.6500	10.97	17.6141	13.27
Índice de Contracción Lineal (IL)						Resultados		
No.	Barra	Longitud de la barra (cm)	Longitud seca (cm)	ΔL (cm)	IL	<i>L_w</i> =	91.57	<i>I_p</i> =
1	C	10.12	8.12	2.00	19.76	<i>L_p</i> =	44.89	46.68
						<i>L_s</i> =	13.27	
						<i>I_L</i> =	19.76	
Clasificación de finos								MH
<p>CURVA DE FLUIDEZ PARA EL CONO INGLÉS</p>								

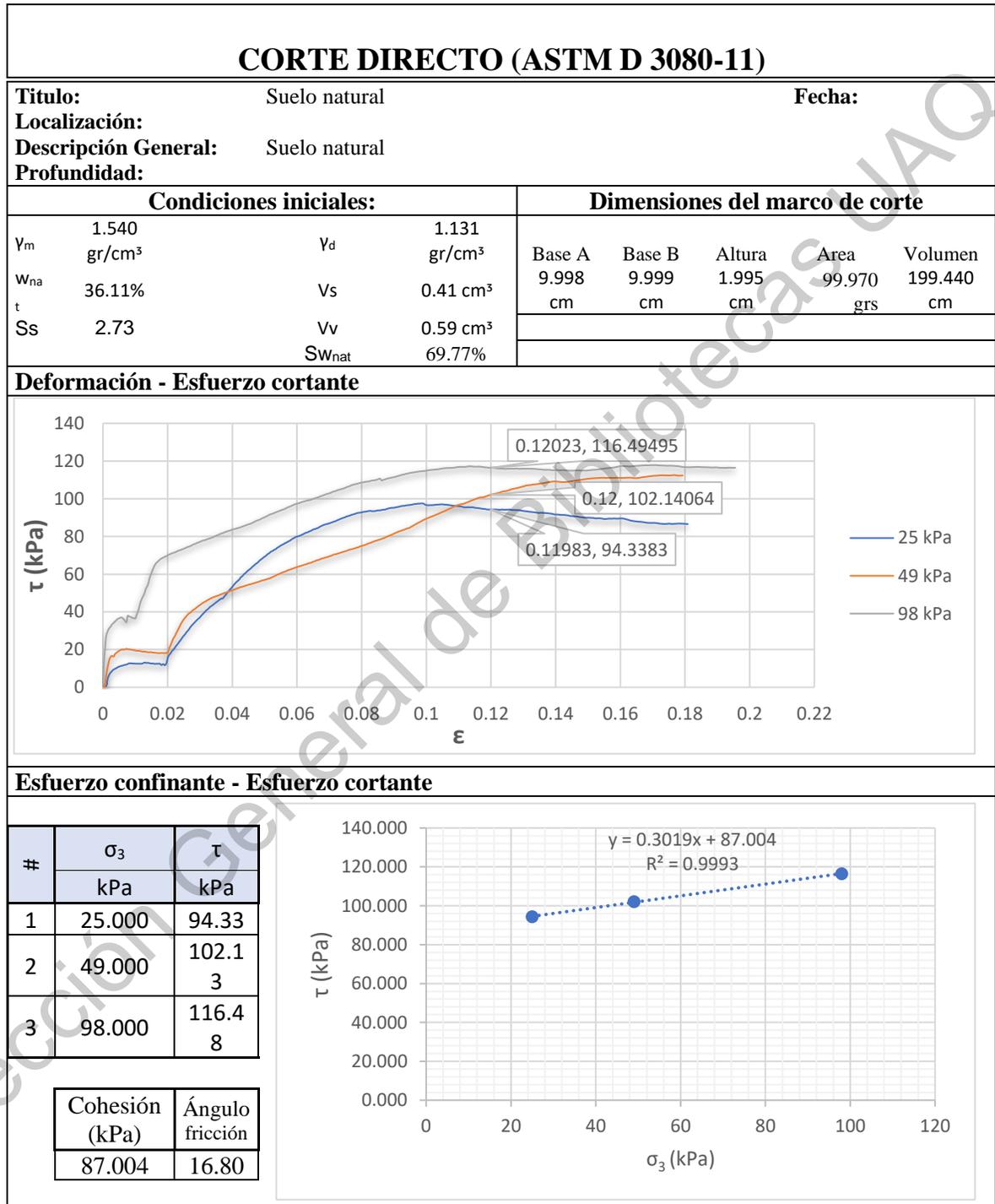
Apéndice C

RESISTENCIA AL ESFUERZO

CORTANTE

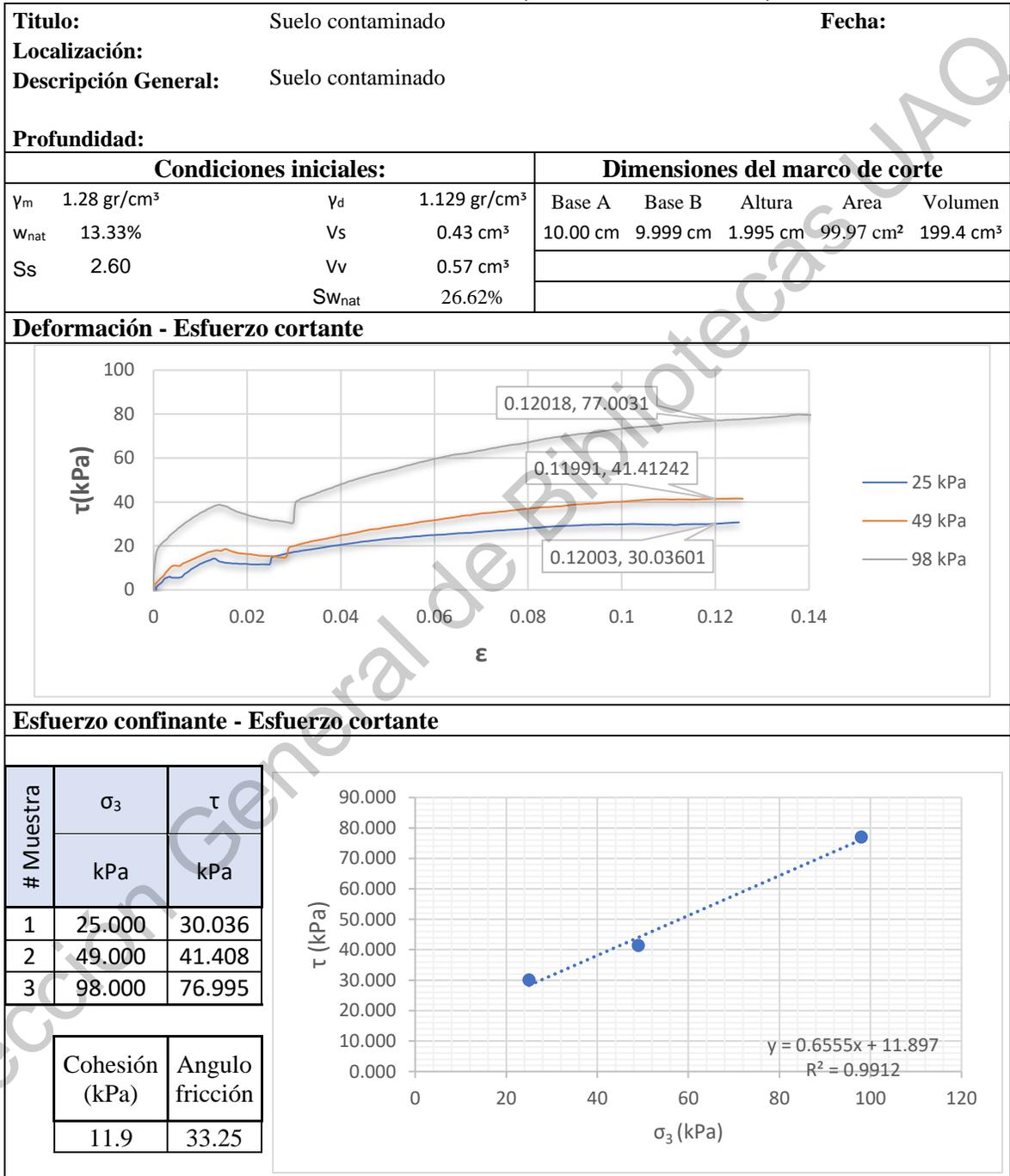
Dirección General de Bibliotecas UAQ

C.1 Suelo Natural



C.2 Suelo Contaminado

CORTE DIRECTO (ASTM D 3080-11)

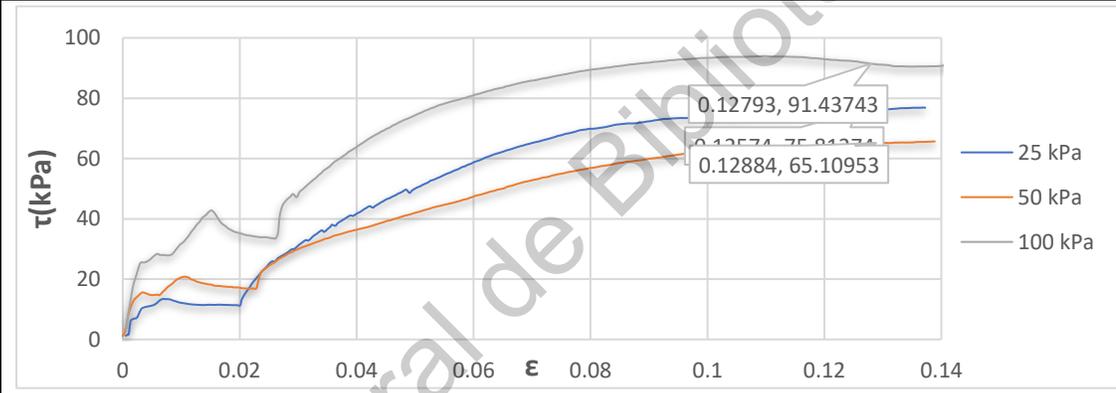


C.3 Suelo tratado mediante Biopilas

CORTE DIRECTO (ASTM D 3080-11)

Título:	Suelo en biopilas			Fecha:	
Localización:	Suelo en biopilas				
Descripción General:	Suelo en biopilas				
Condiciones iniciales:			Dimensiones del marco de corte		
γ_m	1.29 gr/cm ³	γ_d	1.120 gr/cm ³	Base A	9.998 cm
w_{nat}	15.14%	V_s	0.44 cm ³	Base B	9.999 cm
S_s	2.53	V_v	0.56 cm ³	Altura	1.995 cm
		S_{Wnat}	30.44%	Area	99.970 cm ²
				Volumen	199.44 cm ³

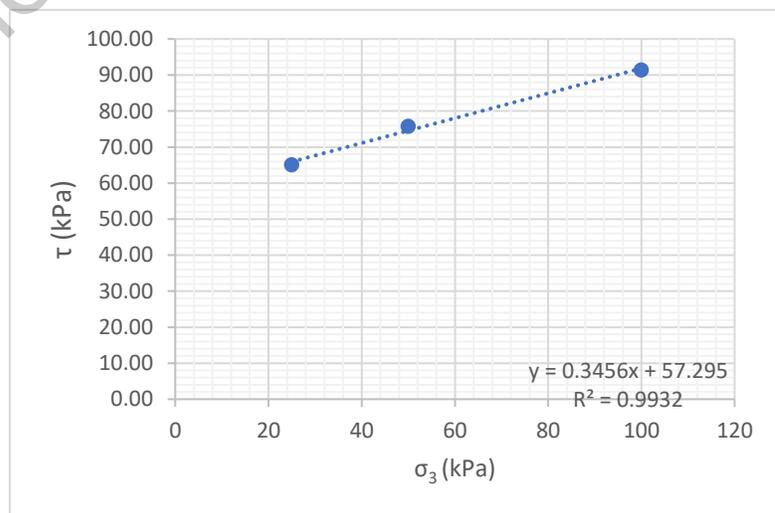
Deformación - Esfuerzo cortante



Esfuerzo confinante - Esfuerzo cortante

# Muestra	σ_3 kPa	τ kPa
1	25.00	65.11
2	50.00	75.81
3	100.00	91.44

Cohesión (kPa)	Angulo de fricción
57.3	19.06



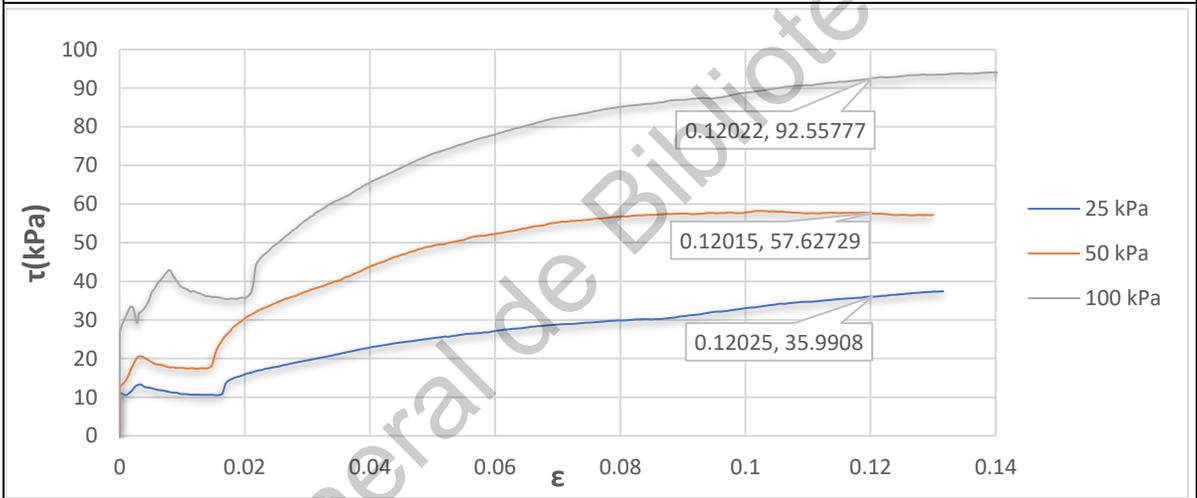
C.4 Suelo tratado mediante Atenuación Natural

CORTE DIRECTO (ASTM D 3080-11)

Título:	Suelo en atenuación natural	Fecha:	
Localización:			
Descripción General:	Suelo en atenuación natural		
Profundidad:			

Condiciones iniciales:				Dimensiones del marco de corte				
γ_m	1.300 gr/cm ³	γ_d	1.129 gr/cm ³	Base A	Base B	Altura	Area	Volumen
w_{nat}	15.14%	V_s	0.45 cm ³	9.998 cm	9.999 cm	1.995 cm	99.970 cm ²	199.44 cm ³
S_s	2.53	V_v	0.55 cm ³					
		SW_{nat}	30.87%					

Deformación - Esfuerzo cortante



Esfuerzo confinante - Esfuerzo cortante

