

Maestría en Ingeniería Civil

Impacto geotécnico de los derrames de diésel en suelos finos

Lady Sofía Rodríguez Cuervo

Bogotá, D.C., 10 de febrero de 2017



Impacto geotécnico de los derrames de diésel en suelos finos

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en geotecnia**

José Vicente Amórtegui Gil

Director

Bogotá, D.C., 10 de febrero de 2017



La tesis de maestría titulada “Impacto geotécnico de los derrames de diésel en suelos finos”,
presentada por Lady Sofía Rodríguez Cuervo, cumple con los requisitos establecidos para
optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia.

Director de la tesis

José Vicente Amórtegui Gil

Jurado

Sandra X. Campagnoli M

Jurado

Ricardo Salazar F.

Bogotá, D.C., 10 de febrero de 2017

Dedicatoria

A Dios, y mi familia por su apoyo incondicional para que esta investigación sea un éxito y un punto de referencia para crear nuevos escenarios de conocimiento.

Agradecimientos

La autora expresa su agradecimiento al ingeniero José Vicente Amórtegui, por su guía y contribuciones para el éxito de esta investigación.

A la Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito, institución que facilitó las instalaciones de sus laboratorios para el desarrollo de la investigación.

A todas aquellas personas que durante el proceso de investigación aportaron su conocimiento y experiencia para resolver acertadamente los retos que planteó el estudio.

Resumen

Actualmente el crecimiento de la población mundial ha generado el aumento en el consumo del petróleo y sus derivados, en donde se han masificado las refinerías, redes de transporte, centros de almacenamiento y venta de combustibles, todo esto aumenta la probabilidad de que se presenten derrames. Estos derrames generan que los hidrocarburos por efecto de la gravedad y las fuerzas capilares se desplacen vertical y horizontalmente a través de los diferentes estratos del suelo. Entonces surge el interrogante: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y la composición mineralógica de los suelos finos cuando están contaminados de diésel? Es un cuestionamiento que se han realizado diversos autores en el mundo pero que requiere continuar la línea de investigación, en el caso particular de Colombia las investigaciones son escasas. La investigación se centró en estudiar cuatro (4) tipos de suelos finos que correspondieron a arcillas, y la metodología de experimentación se basó en una fase exploratoria y posteriormente, la fase experimental realizada con base en la revisión de la literatura donde se permitió un tiempo de exposición al hidrocarburo de una semana. El diésel fue elegido como hidrocarburo porque es el principal combustible que se maneja en Colombia y tiene los menores riesgos de manipulación en el laboratorio. Dar respuesta a la pregunta de investigación implicó la realización de ensayos de laboratorio para determinar contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, límites de Atterberg, resistencia a la compresión confinada y análisis de mineralogía con difracción de rayos X (DRX), método del polvo, de las muestras control y las muestras con tratamiento de 1%, 3% y 6% de diésel respecto al peso seco de las muestras.

Los resultados de la investigación evidencian la incertidumbre en las propiedades geotécnicas de los suelos usados en la experimentación por la interacción que tuvieron con el diésel. El contenido de humedad incrementó, aunque la expresión de su cálculo es cuestionable; la gravedad específica de los sólidos y la resistencia a la compresión confinada disminuyó; y los límites de Atterberg tienen un comportamiento indefinido por la presencia del diésel y se calcula como un contenido de humedad. La composición mineralógica y la clasificación (SUCS) de las unidades experimentales no se vieron afectadas por la presencia del diésel.

En síntesis, esta investigación comprobó los cambios en las propiedades geotécnicas de las unidades experimentales con presencia de diésel, y deja el planteamiento de futuras investigaciones con base en los resultados obtenidos.

Palabras clave: arcillas, diésel, propiedades geotécnicas, mineralogía.

Abstract

Currently the growth of the world population has led to increased consumption of oil and its derivatives, which have become massive refineries, transport networks, storage facilities and fuel sales all increase the likelihood of spills. These effusions hydrocarbons generated by gravity and capillary forces to move vertically and horizontally through different soil layers. Then the question arises: ¿what happens in the geotechnical properties and the mineralogical composition of the fine soils when it is contaminated of diesel?

It is a question that many authors have realized in the world but that needs to continue the line of research, in the case of Colombia area a few investigations. The research centred on studying four (4) types of fine soils which corresponded to clays, and methodology of experimentation was based on an exploratory phase and subsequently, the experimental phase carried out based on the literature review where was allowed a time of exposition to hydrocarbon of one week. Diesel was chosen as hydrocarbon because it is the main fuel that is handled in Colombia and have the lowest risks of manipulation in the laboratory. To give answer the research question involved the realization the laboratory tests to determine moisture content, specific gravity of solids, Atterberg limits, resistance to unconfined compression and analysis of mineralogy with X-ray diffraction (XRD), method of dust, of the control samples and samples with treatment of 1%, 3% and 6% of diesel with respect to the dry weight of the samples.

The results of the research have shown the uncertainty in the geotechnical properties of the soils used in experimentation by the interaction that they had with diesel. The moisture content increase, although the expression of its calculation is questionable; the specific gravity of the solids and the resistance to unconfined compression decreased; and the Atterberg limits have an indefinite behavior due to the presence of diesel and it is calculated as a moisture content. The mineralogical composition and classification (USCS) of the experimental units were not affected by the presence of diesel.

In brief, this research found changes in the geotechnical properties of the experimental units with presence of diesel, and let the approach of future research based on the results obtained.

Keywords: clays, diesel, geotechnical properties, mineralogy.

Índice general

Introducción.....	25
Capítulo I. Estado del Arte.....	30
1.1. Antecedentes de la Investigación	31
1.2. Revisión de las Variables de Interés en la Investigación	35
1.2.1 Contenido de humedad.....	35
1.2.2 Gravedad específica de los sólidos.	36
1.2.3 Límites de Atterberg.....	38
1.2.4 Clasificación de los suelos.....	44
1.2.5 Estructura mineralógica.	45
1.2.6 Resistencia a la compresión inconfiada del suelo.	47
1.3. Propuesta de Investigación.....	49
Capítulo II. Problema de Investigación.....	50
2.1. Planteamiento del Problema.....	50
2.1.1 Los hidrocarburos.	50
2.1.2 Producción de hidrocarburos a nivel mundial.	53
2.1.3 Derrames en Colombia.	53
2.2. Objetivos de la Investigación	56
2.2.1 Objetivo general.....	56
2.2.2 Objetivos específicos.....	56
2.3. Justificación de la Investigación.....	57
2.4. Limitaciones de la Investigación	58
Capítulo III. Marco Teórico	61

3.1. Minerales de las Arcillas	61
3.1.1 Difracción de rayos X, DRX.	68
3.1.2 Doble capa difusa.	70
3.1.3 Fenómeno de adsorción.	71
3.2. Propiedades Índice de los Suelos	76
3.2.1 Relaciones gravimétricas.	78
3.2.2 Relaciones volumétricas.....	78
3.2.3 Gravedad específica de los sólidos.....	80
3.2.4 Consistencia del suelo.....	81
3.2.4.1 Límite líquido.	82
3.2.4.2 Límite plástico.....	85
3.2.4.3 Límite de contracción.....	86
3.3. Sistema de Clasificación de Suelos	87
3.3.1 Carta de plasticidad.....	88
3.4. Resistencia a la Compresión Inconfinada de los Suelos	89
3.5. Hidrocarburos en el Suelo.....	91
3.5.1 Transporte de hidrocarburos en el suelo.	92
3.5.1.1 Parámetros de transporte de los hidrocarburos.	93
Capítulo IV. Fase Exploratoria.....	101
4.1. Características de los Materiales	101
4.2. Características del Diésel	101
4.3. Determinación del Porcentaje de Diésel para Impregnar las Muestras	102
Capítulo V. Metodología	112
5.1. Diseño de la Investigación	112

5.2. Preparación de las Muestras	116
5.3. Ensayos de Laboratorio	118
5.3.1 Contenido de humedad.	118
5.3.2 Gravedad específica de los sólidos.	120
5.3.3 Límites de Atterberg.	121
5.3.4 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).	121
5.3.5 Difracción por rayos X en muestra total.	122
5.3.6 Ensayo de compresión inconfiada.	123
Capítulo VI. Resultados Experimentales y Discusión	126
6.1. Discusión de la Fase Experimental	126
6.2. Suelo Tipo A	129
6.2.1 Composición mineralógica.	130
6.2.2 Contenido de humedad.	131
6.2.3 Gravedad específica de los sólidos.	133
6.2.4 Límites de Atterberg.	135
6.2.4.1 Límite líquido.	139
6.2.4.2 Límite plástico.	141
6.2.4.3 Límite de contracción.	142
6.2.4.4 Índice de plasticidad.	144
6.2.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).	146
6.2.6 Clasificación del suelo según SUCS.	148
6.2.7 Resistencia a la compresión inconfiada.	150
6.2.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas	153

6.2.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.	154
6.3. Suelo Tipo B	156
6.3.1 Composición mineralógica.	157
6.3.2 Contenido de humedad.	158
6.3.3 Gravedad específica de los sólidos.	160
6.3.4 Límites de Atterberg.	161
6.3.4.1 Límite líquido.	162
6.3.4.2 Límite plástico.	164
6.3.4.3 Límite de contracción.	166
6.3.4.4 Índice de plasticidad.	168
6.3.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).	170
6.3.6 Clasificación del suelo según SUCS.	172
6.3.7 Resistencia a la compresión inconfiada.	174
6.3.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.	177
6.3.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.	179
6.4. Suelo Tipo C	180
6.4.1 Composición mineralógica.	181
6.4.2 Contenido de humedad.	182
6.4.3 Gravedad específica de los sólidos.	184
6.4.4 Límites de Atterberg.	186
6.4.4.1 Límite líquido.	186
6.4.4.2 Límite plástico.	188
6.4.4.3 Límite de contracción.	190

6.4.4.4 Índice de plasticidad.....	192
6.4.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	194
6.4.6 Clasificación del suelo según SUCS.....	196
6.4.7 Resistencia a la compresión inconfiada.....	198
6.4.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.....	201
6.4.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.....	202
6.5. Suelo Tipo E.....	204
6.5.1 Composición mineralógica.....	205
6.5.2 Contenido de humedad.....	206
6.5.3 Gravedad específica de los sólidos.....	208
6.5.4 Límites de Atterberg.....	210
6.5.4.1 Límite líquido.....	210
6.5.4.2 Límite plástico.....	213
6.5.4.3 Límite de contracción.....	214
6.5.4.4 Índice de plasticidad.....	216
6.5.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	218
6.5.6 Clasificación del suelo según SUCS.....	220
6.5.7 Resistencia a la compresión inconfiada.....	222
6.5.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.....	224
6.5.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.....	226
6.6. Variación de las Propiedades Geotécnicas Medibles en el Laboratorio.....	227
6.6.1 Contenido de humedad.....	228
6.6.2 Gravedad específica de los sólidos.....	234

6.6.3 Límite líquido.	236
6.6.4 Límite plástico.	237
6.6.5 Índice de plasticidad.....	239
6.6.6 Límite de contracción.	240
6.6.7 Resistencia a la compresión inconfiada.	242
Capítulo VII. Conclusiones y recomendaciones	243
7.1 Suelo A (MH)	243
7.2 Suelo B (CH).....	244
7.3 Suelo C (CH).....	245
7.4 Suelo E (CL).....	245
Bibliografía	249

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de las investigaciones sobre suelos contaminados por hidrocarburos	32
Tabla 2. Resultados de las investigaciones respecto a la gravedad específica de los sólidos	37
Tabla 3. Resultados de las investigaciones respecto al límite líquido	38
Tabla 4. Resultados de las investigaciones respecto al límite plástico	40
Tabla 5. Resultados de las investigaciones respecto al índice de plasticidad.....	42
Tabla 6. Resultados de las investigaciones respecto al límite de contracción	43
Tabla 7. Resultados de las investigaciones acerca de la composición mineralógica y estructura del suelo	45
Tabla 8. Resultados de las investigaciones acerca de la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos.....	47
Tabla 9. Indicadores del volumen de los hidrocarburos transportados y los hurtos en Colombia	55
Tabla 10. Valores típicos de superficie específica de los minerales de arcilla	63
Tabla 11. Ejemplo de minerales del grupo montmorillonita	65
Tabla 12. Ejemplo de minerales del grupo de las micas	66
Tabla 13. Valores típicos de intercambio catiónico	74
Tabla 14. Clasificación del potencial de expansión según CIC	84
Tabla 15. Clasificación del potencial de expansión según el límite líquido	84
Tabla 16. Clasificación de la plasticidad de los suelos según Burmister.....	85
Tabla 17. Valores de los límites de Atterberg para diferentes minerales de arcilla	87
Tabla 18. Criterios de interpretación de la sensibilidad de las arcillas	90
Tabla 19. Especificaciones del diésel en Colombia.....	102
Tabla 20. Resultados de impregnación de diésel a las muestras en condición de natural	105
Tabla 21. Ensayo de ignición de la muestra D, según la norma INV 121 E – 13	108

Tabla 22. Resultados de impregnación de diésel a las muestras secadas por 2 horas	110
Tabla 23. Resultados de contenido de humedad a la temperatura de 110 ± 5 °C	127
Tabla 24. Resultados de contenido de humedad a la temperatura de 50 ± 5 °C ..	127
Tabla 25. Incertidumbre del contenido de humedad en las muestras sin hidrocarburo	128
Tabla 26. Resultados del ensayo de ignición al suelo A, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13	129
Tabla 27. Resultados de límites de Atterberg para el suelo A en estado natural	136
Tabla 28. LL, LP, LC e IP del suelo A.	138
Tabla 29. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo A.....	153
Tabla 30. Resultados del ensayo de ignición al suelo B, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13	156
Tabla 31. LL, LP, LC e IP del suelo B.	162
Tabla 32. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo B.....	178
Tabla 33. Resultados del ensayo de ignición al suelo C, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13	181
Tabla 34. LL, LP, LC e IP del suelo C.	186
Tabla 35. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo C.....	201
Tabla 36. Resultados del ensayo de ignición al suelo E, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13	204
Tabla 37. LL, LP, LC e IP del suelo E.	210
Tabla 38. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo E.....	225
Tabla 39. Valores teóricos de contenido de humedad	230

Índice de figuras

Figura 1. Relación entre el contenido de humedad real y el contenido de humedad cuasi para una arcilla caolinita sometida a tratamiento con diésel. Fuente: (Liu et al., 2015, p. 4839)	36
Figura 2. Transporte de hidrocarburos ligeros en el suelo producto de una fuga. Fuente: (Huaiquilaf, 2008, p. 23).....	52
Figura 3. Transporte de hidrocarburos ligeros en un suelo fracturado. Fuente: (Newell et al., 2015, p. 8)	52
Figura 4. Canasta de combustibles en Colombia, 2012. Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)	54
Figura 5. Mapa de la infraestructura petrolera. Fuente: («Mapa de Infraestructura Petrolera», 2016).....	55
Figura 6. Condiciones de formación de algunos minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio. Fuente: (Ahmed, 1985, p. 8)	62
Figura 7. Interacción de las partículas de arcilla con las moléculas de agua. Fuente: (Leoni, s. f.)	70
Figura 8. Comportamiento de la doble capa difusa con la cercanía a las partículas de arcilla. Fuente: (Leoni, s. f.).....	71
Figura 9. Diagrama de fases. (a) suelo natural; (b) fases presentes en el suelo. Fuente: (Das & Cera, 2001, p. 18)	77
Figura 10. Efecto de la concentración iónica en el límite líquido de una bentonita cálcica. Fuente: (Montoro, 2011, p. 49).....	82
Figura 11. Potencial de expansión de los suelos arcillosos según CIC y LL. Fuente: (Yilmaz, 2004)	84
Figura 12. Carta de plasticidad. Fuente: (Das, Cera Alonso, & Bernal Carreño, 2001, p. 19).....	88
Figura 13. Concepto de transporte de hidrocarburos en el suelo. Fuente: (Sale, 2001, p. 7).....	92
Figura 14. Curvas de permeabilidad relativa. Fuente: (Newell et al., 2015, p. 5) ..	96

Figura 15. Comportamiento de la permeabilidad para las tres fases de flujo. Fuente: (International Symposium on Geoenvironmental Engineering, Chen, Tang, & Zhan, 2010, p. 223)	97
Figura 16. Fases potenciales del hidrocarburo en suelos no saturados. Fuente: (Newell et al., 2015, p. 3)	98
Figura 17. Migración de hidrocarburos ligeros a través de medios fracturados. Fuente: (Newell et al., 2015, p. 8)	99
Figura 18. Proceso de impregnación de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	103
Figura 19. Muestra A después de 7 días sumergida en diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	106
Figura 20. Muestra B, C y D después de 7 días sumergidas en diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	107
Figura 21. Corte longitudinal a la muestra C después de sumergirse en diésel 7 días. Fuente: Elaboración de la autora.	109
Figura 22. Preparación de muestras para trituración. Fuente: Elaboración de la autora.	116
Figura 23. Muestra con adición de agua y homogenizada. Fuente: Elaboración de la autora.	117
Figura 24. (a) Proceso de adición de diésel (b) Conservación de muestras para cada porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	117
Figura 25. Difractómetro de rayos X, gama Emyprean, marca PANalytical. Fuente: («PANalytical - Emyprean», 2016)	122
Figura 26. Elementos para compactar las muestras. Fuente: Elaboración de la autora.	124
Figura 27. Compactación y elaboración de las probetas. Fuente: Elaboración de la autora.	124
Figura 28. Equipos para el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente: Elaboración de la autora.	125

Figura 29. Muestras del suelo A con diésel y presencia de microorganismos. Fuente: Elaboración de la autora.	130
Figura 30. Contenido de humedad del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	132
Figura 31. Gravedad específica de los sólidos del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	134
Figura 32. Límite líquido del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	139
Figura 33. Límite plástico del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	142
Figura 34. Límite de contracción del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	143
Figura 35. Índice de plasticidad del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	145
Figura 36. CIC del suelo A con base en los resultados del LL a 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	147
Figura 37. CIC del suelo A con base en los resultados del LL a 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	147
Figura 38. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	148
Figura 39. Relación ente el IP del suelo A y el IP de la línea A (110 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	149
Figura 40. Relación ente el IP del suelo A y el IP de la línea A (50 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	149
Figura 41. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	151
Figura 42. Variación de los parámetros de resistencia del suelo A con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	152
Figura 43. Contenido de humedad del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	158
Figura 44. Gravedad específica de los sólidos del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	161
Figura 45. Límite líquido del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	163
Figura 46. Límite plástico del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	165

Figura 47. Límite de contracción del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	168
Figura 48. Índice de plasticidad del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora. .	169
Figura 49. CIC del suelo B con base en los resultados del LL a 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	171
Figura 50. CIC del suelo B con base en los resultados del LL a 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	172
Figura 51. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	173
Figura 52. Relación ente el IP del suelo B y el IP de la línea A (110 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	173
Figura 53. Relación ente el IP del suelo B y el IP de la línea A (50 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	174
Figura 54. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	175
Figura 55. Variación de los parámetros de resistencia del suelo A con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	176
Figura 56. Contenido de humedad del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	183
Figura 57. Gravedad específica de los sólidos del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	185
Figura 58. Límite líquido del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	187
Figura 59. Límite plástico del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	189
Figura 60. Límite de contracción del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	192
Figura 61. Índice de plasticidad del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora. .	193
Figura 62. CIC del suelo C con base en los resultados del LL a 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	195
Figura 63. CIC del suelo A con base en los resultados del LL a 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	195
Figura 64. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	196

Figura 65. Relación ente el IP del suelo C y el IP de la línea A (110 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	197
Figura 66. Relación ente el IP del suelo C y el IP de la línea A (50 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	197
Figura 67. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	199
Figura 68. Variación de los parámetros de resistencia del suelo C con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	200
Figura 69. Contenido de humedad del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	207
Figura 70. Gravedad específica de los sólidos del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	209
Figura 71. Límite líquido del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	211
Figura 72. Límite plástico del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	213
Figura 73. Límite de contracción del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	215
Figura 74. Índice de plasticidad del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	217
Figura 75. CIC del suelo E con base en los resultados de LL a 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	219
Figura 76. CIC del suelo E con base en los resultados de LL a 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	219
Figura 77. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	220
Figura 78. Relación ente el IP del suelo E y el IP de la línea A (110 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	221
Figura 79. Relación ente el IP del suelo E y el IP de la línea A (50 ± 5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.	221
Figura 80. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	222
Figura 81. Variación de los parámetros de resistencia del suelo E con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.	223

Figura 82. Contenido de humedad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	228
Figura 83. Contenido de humedad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	229
Figura 84. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.	231
Figura 85. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.	232
Figura 86. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.	233
Figura 87. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.	234
Figura 88. Gravedad específica de los sólidos de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	235
Figura 89. Gravedad específica de los sólidos de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 60 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	235
Figura 90. Límite líquido de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	236
Figura 91. Límite líquido de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	237
Figura 92. Límite plástico de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	238
Figura 93. Límite plástico de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.	238
Figura 94. Índice de plasticidad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	239

Figura 95. Índice de plasticidad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	240
Figura 96. Límite de contracción de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	241
Figura 97. Límite de contracción de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.....	241
Figura 98. Resistencia a la compresión inconfiada de los suelos A, B, C y E. Fuente: Elaboración de la autora.	242

Índice de anexos

Anexo 1. Distribución de los productos del petróleo por continente	258
Anexo 2. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 0% diésel	259
Anexo 3. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 1% diésel	262
Anexo 4. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 3% diésel	267
Anexo 5. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 6% diésel	272
Anexo 6. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 0% diésel	277
Anexo 7. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 1% diésel	280
Anexo 8. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 3% diésel	285
Anexo 9. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 6% diésel	290
Anexo 10. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 0% diésel	295
Anexo 11. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 1% diésel	298
Anexo 12. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 3% diésel	303
Anexo 13. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 6% diésel	308
Anexo 14. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 0% diésel	313
Anexo 15. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 1% diésel	316
Anexo 16. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 3% diésel	321
Anexo 17. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 6% diésel	326

Anexo 18. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo A con 0% de diésel	331
Anexo 19. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo A con 6% de diésel	332
Anexo 20. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo B con 0% de diésel	333
Anexo 21. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo B con 6% de diésel	334
Anexo 22. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo C con 0% de diésel	335
Anexo 23. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo C con 6% de diésel	336
Anexo 24. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo E con 0% de diésel	337
Anexo 25. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo E con 6% de diésel	338
Anexo 26. Diagrama de fases del suelo A	339
Anexo 27. Diagrama de fases del suelo B	341
Anexo 28. Diagrama de fases del suelo C	343
Anexo 29. Diagrama de fases del suelo E	345

Introducción

La creciente dinámica mundial ha generado el incremento del consumo de hidrocarburos, donde la producción petrolera y su infraestructura se ha diversificado. En el caso de Colombia, los productos derivados de los hidrocarburos son transportados por gasoductos, oleoductos y carreteras; estos productos corresponden a diésel, gasolina, jet fuel, gas natural, petróleo, biodiesel y etanol, siendo el diésel el principal combustible.

Es importante considerar que todo sistema es vulnerable a presentar fallas accidentales o provocadas. En el caso del transporte de hidrocarburos se pueden presentar derrames, fugas o tomas clandestinas, donde estos hidrocarburos inicialmente entrarán en contacto con la cobertura vegetal, si esta existe, o con los materiales para carreteras. En la medida que transcurre el tiempo, por efecto de la fuerza de la gravedad y las fuerzas capilares se infiltra en el suelo, siendo los suelos finos más susceptibles respecto a los suelos granulares. Por ejemplo, en las arenas predominan los granos de cuarzo, que son mucho más resistentes a la meteorización y a las sustancias químicas respecto a los suelos finos; así mismo, los suelos finos tienen mayor área superficial lo que facilita la impregnación del hidrocarburo en sus partículas. Estas son las razones por las cuales los suelos finos son objeto de investigación, donde la interacción entre el hidrocarburo y las partículas de estos suelos pueden generar infinidad de consecuencias.

Este tema se ha estudiado desde el punto de vista edafológico, agrícola y ambiental, como respuesta a la preocupación por la afectación que sea producido en el medio ambiente por las actividades humanas; ahora bien, a nivel geotécnico el interés es poco, más aún en Colombia donde no se reporta la totalidad de incidentes o simplemente se presume que la afectación del suelo en términos geotécnicos no es representativa.

No obstante, al considerar el suelo parte fundamental de las obras de ingeniería civil vale la pena estudiar la interacción entre el suelo y los hidrocarburos a nivel geotécnico, pues un cambio en las características del suelo puede llegar a modificar su clasificación y uso en las obras actuales o en la construcción de las obras futuras. Por consiguiente, la presente investigación se centra en estudiar la interacción entre el diésel y las partículas de los suelos finos de Colombia. Este hidrocarburo se eligió por ser el principal combustible que se maneja en Colombia y por presentar los menores riesgos de manipulación en el laboratorio.

Entonces la pregunta de investigación es: ¿qué sucede en las características físicas, propiedades índice, resistencia a la compresión inconfiada y composición mineralógica de los suelos finos cuando hay presencia de diésel? Una pregunta cuya respuesta es incierta, si bien la revisión de la literatura evidencia cambios, estos varían según el tipo de suelo y porcentaje de hidrocarburo utilizado en los estudios; aun así, todo cambio que se presente en el suelo, ya sea a nivel de minerales, propiedades índice o resistencia genera efectos en su comportamiento, lo cual influye en los diseños geotécnicos y las recomendaciones constructivas.

De acuerdo con investigaciones recientes, los derrames de hidrocarburos afectan la estructura del suelo por la ruptura de los agregados, donde se aumenta la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico (Brito, Lema, & García, 2003, p. 89); en consecuencia, si estos suelos son usados como materiales para carreteras o en la construcción de obras civiles sus cambios estructurales, mineralógicos y propiedades índice son cruciales para asegurar la estabilidad y seguridad en las obras.

La falta de investigación en este tema es de relevancia para el campo de la geotecnia que se encuentra en constante evolución, permitiendo presentar la magnitud de los cambios en los parámetros característicos del suelo al tener hidrocarburos dentro de su estructura, y dar un punto de partida para definir las consideraciones dentro de los estudios y diseños geotécnicos cuando se detecten suelos con hidrocarburos.

Cabe agregar que, dentro de la revisión de la literatura se encuentran artículos y tesis que investigaron lo que sucede en los suelos con hidrocarburos. Por ejemplo, un estudio realizado en India, a una arcilla y limo de baja plasticidad con presencia de diésel evidencia que, la gravedad específica de los sólidos decrece en la medida que aumenta la cantidad de hidrocarburo presente en el suelo (Walia, Singh, & Kaur, 2013).

Así mismo, un estudio en China, Nanjing, a una arcilla lodosa y limosa con diésel concluye que disminuyó el tamaño de las partículas, lo cual se evidenció en el aumento en la cantidad de partículas tamaño arcilla; y el pH disminuyó. Sin embargo, los límites líquido y plástico, aunque disminuyeron no tienen una influencia representativa para el comportamiento de este material (Bian, Liu, Cai, & Chu, 2016).

Por su parte, un estudio en China, Ubei, a una arcilla con presencia de diésel, evidencia que el límite líquido se reduce en un 27%, el límite plástico disminuye rápidamente en un 46.6% y el índice de plasticidad aumenta levemente (Huang & Lu, 2014).

Igualmente, un estudio en India, Kerala, a un suelo arcilloso con diésel, referencia que el pH se aumenta por la presencia del hidrocarburo, los límites líquido y plástico disminuyen junto al coeficiente de permeabilidad (Joseph & Hari, 2015).

En la misma línea, un estudio en India, a una arcilla de baja compresibilidad (CL) y un limo de baja compresibilidad (ML) con presencia de diésel concluye que la gravedad específica de los sólidos disminuye. Por otra parte, los límites líquido y plástico aumentan, y la resistencia a la compresión inconfiada se reduce (Walia et al., 2013).

Adicionalmente, un estudio en México, Querétaro, a una arcilla de alta plasticidad (CH) con presencia de diésel concluye que los límites líquido y plástico aumentan; se reporta que al realizar ensayos triaxiales la falla del suelo en estado natural es dúctil, pero con la presencia de diésel es frágil aumentando su rigidez (Zárate, 2014).

Además, un estudio a las propiedades ingenieriles de una arcilla caolinita en China con diésel concluye que al aumentar el porcentaje de diésel presente en el suelo los límites líquido y plástico disminuyen, pero se presenta un ligero aumento del índice de plasticidad. Así mismo, se estudió la resistencia a la compresión inconfiada donde los resultados evidencian su disminución por la presencia del diésel (Liu, Liu, & Cai, 2015).

De acuerdo con esta breve revisión de la literatura, se evidencia que los cambios en el suelo son variables según el tipo de suelo y porcentaje de hidrocarburo, en consecuencia, para lograr dar respuesta a la pregunta de investigación mencionada anteriormente se realizaron pruebas experimentales y ensayos de laboratorio.

En primer lugar, se realizó la caracterización de diferentes materiales clasificados dentro del grupo de los suelos finos según el SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos); estos materiales se sometieron al proceso de impregnación de diésel en una fase exploratoria, con el fin de definir el máximo porcentaje de hidrocarburo que impregnaba al suelo. Una vez finalizada la fase exploratoria se prepararon las muestras con diésel, asegurando que no se presentarán pérdidas del combustible por evaporación y durante un

periodo de tiempo que permitiera el equilibrio entre el hidrocarburo y el suelo. Una vez se estableció el equilibrio se procedió a la realización de los ensayos de laboratorio que permitieran identificar si hay o no cambio en las propiedades índice, resistencia a la compresión confinada y composición mineralógica de los suelos elegidos para la investigación.

En síntesis, la tesis busca contribuir a la generación de conocimiento científico en Colombia, en una línea de investigación relativamente nueva en el mundo pero que evidencia como las problemáticas ambientales no son ajenas a otras disciplinas como la ingeniería geotécnica, y por supuesto, validar la hipótesis de que se presentan cambios en los suelos finos cuando hay presencia de diésel, siendo su magnitud variable por las características propias de cada suelo.

La tesis se encuentra dividida en seis (6) capítulos. El primer capítulo corresponde a la revisión de la literatura respecto a los estudios geotécnicos que se han realizado a suelos contaminados por diferentes hidrocarburos, concentrando la mayor parte de la revisión documental en suelos finos y cuyo hidrocarburo fuera diésel; no obstante, se presentan otros tipos de suelos e hidrocarburos para que el lector tenga un panorama de los estudios que se han realizado a nivel mundial, donde se evidencian la magnitud de los cambios en las características físicas, propiedades índice, resistencia a la compresión confinada y composición mineralógica por la interacción entre diferentes tipos de suelos e hidrocarburos. Finalmente, constituye una revisión documental para tesis o trabajos de investigación futuros en esta línea.

El segundo capítulo presenta la descripción del problema de investigación ajustado al contexto colombiano; se presentan los objetivos, justificación y limitaciones de la investigación. El tercer capítulo contiene la base teórica que sustenta la realización de los ensayos de laboratorio a nivel de las propiedades índice, resistencia a la compresión confinada y composición mineralógica, de tal forma que el lector comprenda los resultados de los ensayos de laboratorio y porque se eligieron dichos ensayos para la caracterización de los diferentes tipos de materiales que se ensayaron; así mismo, se presentan conceptos generales del transporte de contaminantes en el suelo para que el lector comprenda cómo llega el hidrocarburo a estar presente en la estructura del suelo.

El cuarto capítulo presenta la fase exploratoria de la investigación. Esta fase comprende las pruebas preliminares que se realizaron a diferentes tipos de suelos finos con el fin de determinar el porcentaje máximo de diésel que impregnaba en cada uno ellos. El quinto capítulo contiene la fase experimental y la descripción de la metodología empleada para realizar el proceso de impregnación de diésel en los suelos elegidos para la investigación. En este capítulo se expone el detalle del proceso realizado en el laboratorio, de tal forma que el lector se ilustre en cómo fue el desarrollo de la preparación de las muestras. El sexto capítulo contiene los resultados experimentales de cada uno de los suelos elegidos para la investigación, donde se consideró el efecto de la temperatura a la cual se realizaban los ensayos de laboratorio, es decir, si se conoce de la presencia de hidrocarburos se utilizaron temperaturas de ensayo de 50 ± 5 °C y si se desconoce su presencia se usaron temperaturas de ensayo de 110 ± 5 °C, encontrándose cambios en los valores de las propiedades de acuerdo con la temperatura de ensayo. Además, a lo largo de este capítulo se presentan los análisis y discusión de resultados de cada uno de los suelos elegidos para la investigación. Finalmente, se encuentran las conclusiones y recomendaciones de la investigación de acuerdo con los objetivos propuestos.

Capítulo I. Estado del Arte

Actualmente el crecimiento de la población mundial ha generado el aumento en el consumo del petróleo y sus derivados, donde se han masificado las refinerías, redes de transporte, centros de almacenamiento y venta de combustibles, todo esto aumenta la probabilidad de que se presenten derrames de hidrocarburos.

Los derrames pueden ocurrir por accidentes durante el transporte en carreteras o sistemas ferroviarios, fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción y por tomas clandestinas o atentados contra la infraestructura petrolera (Zárate 2014); entonces, el interrogante es: ¿qué sucede en las características físicas, propiedades índice, resistencia a la compresión inconfina y composición mineralógica del suelo cuando está contaminado por hidrocarburo?

Varios autores se han realizado este cuestionamiento. Izdebska-Mucha y Trzciński (2008) evidencian cambios a nivel microestructural; Zárate (2014) observó cambios en los límites de Atterberg y la resistencia del suelo; Bian et al. (2016) reportan cambios en la distribución de las partículas y una leve influencia en los límites de Atterberg; Ochepe y Joseph (2014) encontraron reducción de la resistencia a la compresión inconfina, haciendo al suelo más susceptible de fallar en la medida que se incremente la cantidad de hidrocarburo; Akinwumi, Diwa y Obianigwe (2014) reportan incremento de los límites líquido y plástico al aumentar el hidrocarburo, pero la gravedad específica se redujo con el incremento de la cantidad del hidrocarburo.

Al igual que otros autores ponen de manifiesto la importancia de continuar haciendo investigaciones para determinar los cambios a nivel de la estructura, mineralogía, características físicas y propiedades índice del suelo ante la presencia de hidrocarburos. Los principales hidrocarburos que se han estudiado son:

- * Petróleo crudo.
- * Gasolina.
- * Diésel.

- * Keroseno.
- * Aceite para motores.
- * Otros.

Todos los resultados de estas investigaciones ponen de manifiesto que las características físicas, propiedades índice, resistencia a la compresión inconfiada, estructura y mineralogía del suelo cambian; sin embargo, hay casos que reportan variaciones no significativas según las condiciones de desarrollo del ensayo, tipo de hidrocarburo, tipo de suelo y porcentaje de hidrocarburo (Tong et al. 2012).

Por lo tanto, la finalidad de este capítulo es presentar los resultados de las investigaciones realizadas para evaluar las características físicas, propiedades índice, resistencia a la compresión inconfiada y composición mineralógica con diferentes tipos de hidrocarburo e introducir la propuesta de investigación.

1.1. Antecedentes de la Investigación

La revisión de la literatura incluyó textos publicados entre 2008 y 2016 buscando tener la mayor información de actualidad; se consultó en las bases de datos de Elsevier, Google Scholar, Springer, CrossRef, Scielo, GeoScienceWorld, Clays and Minerals, entre otras. Las palabras claves usadas en las búsquedas fueron: contaminación, diésel, hidrocarburos, derrames, suelo, propiedades geotécnicas; palabras que definen el problema de investigación.

Los derrames de hidrocarburos en el suelo han sido investigados por medio de ensayos de laboratorio, la Tabla 1 resume estas investigaciones a nivel mundial. Los suelos estudiados varían de arenas con algún contenido de partículas finas a suelos completamente finos. Los hidrocarburos elegidos para los estudios son petróleo crudo, gasóleo, diésel, keroseno, gasolina y aceite para motores, donde el diésel es uno de los combustibles más estudiados.

Tabla 1. Resumen de las investigaciones sobre suelos contaminados por hidrocarburos

País, región	Título	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo
Colombia, batolito antioqueño	Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with gasoline	(Echeverri et al., 2015)	Residual tropical	Gasolina
Inglaterra, Mánchester	Geotechnical properties of oil contaminated soil	(Ransome Daka, Miebaka, 2015)	60% Arena con (10-30%) bentonita y (10-30%) caolinita	Aceite para motores
Nigeria, Eastern Obolo	Effect of crude oil spillage on geotechnical properties of lateritic soil in Okoroete, Eastern Obolo	(Ukpong & Umoh, 2015)	Suelo laterítico	Petróleo crudo
Nigeria, Ogun	Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay	(Akinwumi, Diwa, & Obianigwe, 2014)	Suelo laterítico	Petróleo crudo
China, Nanjing	Influence of diesel pollution on the physical properties of soils	(Bian et al., 2016)	Arcilla lodosa-limosa	Diésel
China, Ubei	Experiment study on the atterberg limits of clay contaminated by oil	(Huang & Lu, 2014)	Arcilla	Petróleo crudo Diésel
Polonia	Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure	(Izdebska-Mucha & Trzciński, 2008)	Suelo glacial 1% grava, 53% arena, 25% limo, 21% arcilla	Diésel
India, Kerala	Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties	(Joseph & Hari, 2015)	Suelo laterítico Suelo arenoso Suelo arcilloso	Diésel
Irán	Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite	(Khosravi, Ghasemzadeh, Sabour, & Yazdani, 2013)	Caolinita	Gasóleo
China	Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil	(Liu et al., 2015)	Caolinita	Diésel

Tabla 1. Continuación

Irán	Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils	(Nasehi, Uromeihy, Nikudel, & Morsali, 2016)	Arena y limo Arcilla	Gasóleo
Nigeria	Effect of Oil Contamination on Lime Stabilized Soil	(Ochepo & Joseph, 2014)	Suelo laterítico estabilizado con limo	Aceite para motores
India, Naini	Effects of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Alluvial Soil Naini, Allahabad	(Pandey & Bind, 2014)	Suelo aluvial	Petróleo
Iraq, Kurdistan	Effect of crude oil products on the geotechnical properties of soil	(Rasheed, Ahmed, & Jassim, 2014)	Arena pobremente gradada con limo	Keroseno Gasóleo
Colombia	Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos	(Serrano Guzmán, Torrado Gómez, & Pérez Ruiz, 2013)	Arena de río	Aceite de carro
India	Study on Geotechnical Properties of Diesel Oil Contaminated Soil	(Solly, Aswathy, Berlin, Krishnaprabha, & Maria, 2014)	Arena con limo	Diésel
China	Effect of Oil Contamination on Atterberg Limits of Soil	(Tong, Chen, Zheng, & Li, 2012)	Arcilla	Diésel Petróleo crudo
India	Study of diesel contaminated clayey soil	(Walia et al., 2013)	Arcilla y limo de baja plasticidad	Diésel
México, Querétaro	Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso	(Zárate, 2014)	Arcilla de alta plasticidad	Diésel
China	Experimental study on engineering properties of diesel contaminated soil	(Tianyuan, Junjie, Yongxia, & Jiangjiao, 2013)	No reporta	Diésel

Fuente: Elaboración de la autora.

Las metodologías utilizadas en los estudios para el proceso de impregnación del suelo con hidrocarburo incluyen:

- i. El suelo del sitio de exploración se encuentra contaminado por hidrocarburo, es decir, es un caso real de un derrame. Se toman muestras del sitio contaminado y otras del sitio sin contaminar, todas en condición inalterada, para luego proceder a realizar los ensayos de laboratorio.
- ii. Simulación del proceso de impregnación del suelo con hidrocarburo, lo cual se desarrolla de diversas formas según el estudio:
 - a) Se definió trabajar con 3 fases (líquido correspondiente al hidrocarburo, aire o gas y sólido). Para esto se secaron las muestras y luego se les adicionó el porcentaje de hidrocarburo respecto al peso seco de la muestra a contaminar previamente definido para el estudio. El objetivo de esto es realizar ensayos de laboratorio donde previamente se ha controlado el porcentaje de hidrocarburo que tendrá el suelo y en algunos casos simular ambientes áridos.
 - b) Se definió estudiar los suelos en condición saturada. Para esto se secaron las muestras por 24 horas, se les adiciona el porcentaje de hidrocarburo respecto al peso seco de la muestra a contaminar y luego se satura, procediendo a la realización de los ensayos de laboratorio.
 - c) Se definió tener como variable de control el contenido de humedad. Para esto se secaron las muestras, se les adiciona la cantidad de agua de acuerdo con el contenido de humedad definido para el estudio, seguidamente se les adiciona el porcentaje de hidrocarburo y se procede a realizar los ensayos de laboratorio.

Los tiempos de exposición al hidrocarburo en las muestras de suelo variaron de días a meses, lo cual es significativo y depende de las restricciones de cada uno de los estudios. Sin embargo, evidencian que un tiempo de 7 días es suficiente para establecer un equilibrio entre el suelo y el hidrocarburo.

Algunas investigaciones ponen de manifiesto que la estructura de los suelos utilizados en los estudios se vieron afectadas a causa de la ruptura de los agregados, donde se aumentó la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico (Brito et al., 2003, p. 89). Con esto se evidencia que, si estos suelos son usados como materiales para carreteras o en la construcción de obras civiles, sus cambios estructurales, mineralógicos y de las propiedades geotécnicas pueden afectar la estabilidad y seguridad en las obras.

1.2. Revisión de las Variables de Interés en la Investigación

El estudio de los cambios de las propiedades del suelo cuando hay presencia de hidrocarburos se desarrolla por medio de ensayos de laboratorio. Las principales variables de interés son los límites de Atterberg, contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, parámetros de resistencia y composición mineralógica, todas características que determinan el comportamiento del suelo.

A continuación, se presentan los resultados de las investigaciones presentadas en la Tabla 1 para las propiedades geotécnicas, composición química y mineralógica de los suelos presentados en dichas investigaciones.

1.2.1 Contenido de humedad.

El contenido de humedad es una propiedad índice que relaciona el peso del agua contenido en el suelo con el peso de su fase sólida. Estudios del contenido de humedad de un suelo de arcilla caolinita en China contaminado con diésel realizado por Liu et al. (2015), evidencian la complejidad en la determinación de esta propiedad por la evaporación del hidrocarburo presente en las muestras durante el secado y porque puede quedar un remanente de hidrocarburo en estado sólido.

Para poder evidenciar estas interacciones los autores definieron los valores de contenido de humedad real y porcentajes de diésel a utilizar, y se determinó el

contenido de humedad cuasi como la relación de pérdida de humedad por secado para cada tratamiento y la masa final de las muestras. Los autores encontraron una relación positiva entre el contenido de humedad cuasi y el contenido de humedad real, siendo para mayores porcentajes de hidrocarburo los valores del contenido de humedad cuasi más pequeños que el valor del contenido de humedad real, esto se evidencia en la Figura 1.

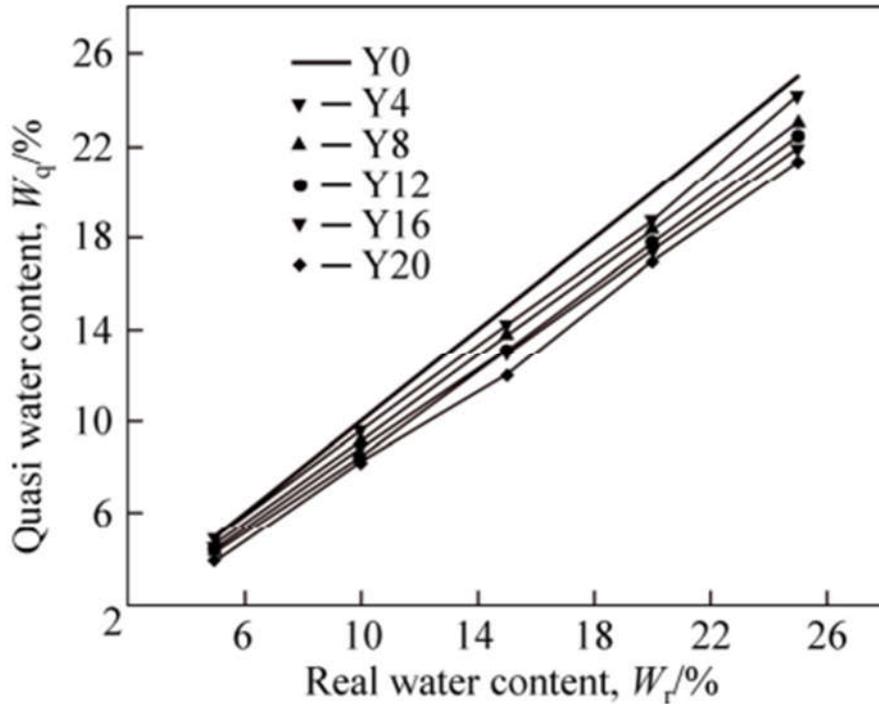


Figura 1. Relación entre el contenido de humedad real y el contenido de humedad cuasi para una arcilla caolinita sometida a tratamiento con diésel. Fuente: (Liu et al., 2015, p. 4839)

1.2.2 Gravedad específica de los sólidos.

La gravedad específica de los sólidos es una propiedad adimensional que relaciona el peso unitario de la fase sólida, γ_s , con el peso unitario del agua a una temperatura normalizada de 20°C, γ_w a 20°C.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w \text{ a } 20^\circ\text{C}}$$

(1.1)

En la Tabla 2 se observa que en la mayoría de los casos de estudio se presenta una reducción progresiva de la gravedad específica de los sólidos en función de la cantidad de hidrocarburo, esto hace más liviano al suelo favoreciendo la porosidad y la permeabilidad.

Sin embargo, es importante mencionar que en el trabajo experimental realizado al norte de Irak donde se utilizó gasóleo y keroseno como hidrocarburos de estudio, se encontró una mayor reducción de la gravedad específica de los sólidos cuando el suelo tenía presencia de gasóleo frente al keroseno (Rasheed et al., 2014, p. 357).

Tabla 2. Resultados de las investigaciones respecto a la gravedad específica de los sólidos

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Resultado
2015	Echeverry et al.	Residual tropical	Gasolina	Se mantuvo en 2.8
2014	Akinwumi I.I., Diwa D y Obianigwe N	Suelo laterítico	Petróleo crudo (0%-10%)	Pasa de 2.51 a 2.41
2014	Z. N. Rasheed, F. R. Ahmed y H. M. Jassim	SP-SM	Keroseno (0%-7.5%) Gasóleo (0%-7.5%)	Pasa de 2.62 a 2.27 (Gasóleo) Pasa de 2.62 a 2.46 (Keroseno)
2013	Serrano Guzmán; Torrado Gómez; Pérez Ruiz	Arena de río	Aceite de carro	Pasa de 2.65 a 2.59
2013	Walia, B.S; Singh, G; Kaur, M	Arcilla y limo de baja plasticidad	Diésel (0%-12%)	Pasa de 2.88 a 2.47

Fuente: Elaboración de la autora.

1.2.3 Límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg son una propiedad del suelo cuyos valores de contenido de humedad permiten la identificación y clasificación del suelo, así mismo permiten establecer los rangos de consistencia del suelo (sólido, semisólido, plástico y líquido). Esta propiedad es importante puesto que se ha encontrado que los hidrocarburos pueden generar cambios en el contenido de humedad alterando la consistencia del suelo. A través de la consistencia del suelo se establece el comportamiento frente a cargas de trabajo, asentamientos y expansiones.

En la Tabla 3 se presentan los resultados respecto al límite líquido, se observa que la gasolina y el diésel en la mayoría de los casos disminuyen este límite, mientras que el aceite para motores, gasóleo y keroseno lo aumentan. Sin embargo, en el caso del petróleo crudo se reporta incremento y disminución, lo cual se debe a las características propias del suelo utilizado en las investigaciones.

Tabla 3. Resultados de las investigaciones respecto al límite líquido

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Resultado
2016	Hang Lian Bian, Song-yu Liu, Guo-jun Cai, Ya chu	Arcilla lodosa-limosa	Diésel (4%-12%)	Pasa de 36.2% (diésel 4%) a 35.1% (diésel 12%)
2016	Sayed Alireza Nasehi; Ali Uromeihy; Mohammad Reza Nikudel; Ali Morsali	CL ML	Gasóleo (0%-9%)	Pasa de 48% a 56% (CL) Pasa de 36% a 41% (ML)
2015	Echeverry et al.	Residual tropical	Gasolina	Pasa de 54% a 52%
2015	Ransome Daka, Miebaka	60% Arena con 10% bentonita y 30% caolinita	Aceite para motores (0%-7.1%)	Pasa de 48% a 58%
2015	Ransome Daka, Miebaka	60% Arena con 30% bentonita y 10% caolinita	Aceite para motores (0%-7.1%)	Pasa de 123% a 135%

Tabla 3. Continuación

2015	Ukpong, E.C Umoh, I.C	Suelo laterítico	Petróleo crudo In situ	Pasa de 29% a 16.04%
2015	Joseph, Jesna; G Hari	Suelo laterítico Suelo arenoso Suelo arcilloso	Suelo laterítico: Diésel (0%-22%) Suelo arcilloso: Diésel (0%-35%)	Pasa de 74.8% a 66% (suelo laterítico) Pasa de 91% a 68% (suelo arcilloso)
2015	LIU Zhi-bin, LIU Song-yu, CAI Yi	Caolinita	Diésel (0%-20%)	Pasa de 35% a 28%
2014	Akinwumi I.I., Diwa D y Obianigwe N	Suelo laterítico	Petróleo crudo (0%-10%)	Pasa de 41% a 65%
2014	Huang, Fa-Xing; Lu, Hai-Jun	Arcilla	Petróleo crudo (0%-12%) Diésel (0%-12%)	Pasa de 48.5% a 53.6% (petróleo crudo) Pasa de 48.5% a 35.4% (diésel)
2014	Zárate, Yanet Antonio	CH	Diésel (0%-30%)	Pasa de 63.33% a 76%
2014	Pandey, Annu; Bind, Y.K	Suelo aluvial 40.3% arena 27.78% limo 31.92% arcilla	Petróleo (0%-16%)	Pasa de 38% a 20%
2014	Z. N. Rasheed, F. R. Ahmed y H. M. Jassim	SP-SM	Keroseno (0%-7.5%) Gasóleo (0%-7.5%)	Pasa de 30.83% a 36.84% (Gasóleo) Pasa de 30.3% a 33.93% (Keroseno)
2014	Solly, George; EA, Aswathy; Sabu, Berlin; NP, Krishnaprabha; George, Maria	SM	Diésel (0%-12%)	Pasa de 33.2% a 23%
2013	Elahe Khosravi, Ghasemzadeh, Mohammad Reza Sabour, Hessam Yazdani	Caolinita	Gasóleo (0%-16%)	Pasa de 45% a 40%
2013	Walia, B.S; Singh, G; Kaur, M	CL-ML	Diésel (0%-12%)	Pasa de 27.05% a 36.78%
2012	Tong, Ling; Chen, Weisheng; Zheng, Xilai; Li, Mei	Loamclay	Diésel (0%-20%) Petróleo crudo (0%-16%)	Pasa de 36.4% a 26% (diésel) Pasa de 36.4% a 41.9% (petróleo crudo)

Fuente: Elaboración de la autora.

En la Tabla 4 se presentan los resultados respecto al límite plástico, se observa que el keroseno, gasóleo y aceite para motores aumentan este límite, en el caso del diésel y el petróleo crudo se reportan incrementos y disminuciones por las características propias de los suelos ensayados.

Tabla 4. Resultados de las investigaciones respecto al límite plástico

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Resultado
2016	Hang Lian Bian, Song-yu Liu, Guo-jun Cai, Ya chu	Arcilla lodosa-limosa	Diésel (4%-12%)	Pasa de 20.5% (diésel 4%) a 19.5% (diésel 12%)
2016	Sayed Alireza Nasehi; Ali Uromeihy; Mohammad Reza Nikudel; Ali Morsali	CL ML	Gasóleo (0%-9%)	Pasa de 23% a 31.5% (CL) Pasa de 27% a 32.5% (ML)
2015	Ransome Daka, Miebaka	60% Arena con 10% bentonita y 30% caolinita	Aceite para motores (0%-7.1%)	Pasa de 13% a 16%
2015	Ransome Daka, Miebaka	60% Arena con 30% bentonita y 10% caolinita	Aceite para motores (0%-7.1%)	Pasa de 22% a 24%
2015	Ukpong, E.C Umoh, I.C	Suelo laterítico	Petróleo crudo In situ	Disminuyo.
2015	Joseph, Jesna; G Hari	Suelo laterítico Suelo arenoso Suelo arcilloso	Suelo laterítico: Diésel (0%-22%) Suelo arcilloso: Diésel (0%-35%)	Pasa de 41.2% a 35% (suelo laterítico) Pasa de 40% a 35% (suelo arcilloso)
2015	LIU Zhi-bin, LIU Song-yu, CAI Yi	Caolinita	Diésel (0%-20%)	Pasa de 19% a 10%
2014	Akinwumi I.I., Diwa D y Obianigwe N	Suelo laterítico	Petróleo crudo (0%-10%)	Pasa de 23% a 34%
2014	Huang, Fa-Xing; Lu, Hai-Jun	Arcilla	Petróleo crudo (0%-12%) Diésel (0%-12%)	Pasa de 26.2% a 24.2% (petróleo crudo) Pasa de 26.2% a 12.2% (diésel)
2014	Pandey, Annu; Bind, Y.K	Suelo aluvial 40.3% arena 27.78% limo 31.92% arcilla	Petróleo (0%-16%)	Pasa de 25% a 17%

Tabla 4. Continuación

2014	Z. N. Rasheed, F. R. Ahmed y H. M. Jassim	SP-SM	Keroseno (0%-7.5%) Gasóleo (0%-7.5%)	Pasa de 26% a 34.12% (Gasóleo) Pasa de 26% a 30.78% (Keroseno)
2014	Solly, George; EA, Aswathy; Sabu, Berlin; NP, Krishnaprabha; George, Maria	SM	Diésel (0%-12%)	Pasa de 30.57% a 21.5%
2014	Zárate, Yanet Antonio	CH	Diésel (0%-30%)	Pasa de 25% a 37%
2013	Elahe Khosravi, Hasan Ghasemzadeh, Mohammad Reza Sabour, Hessam Yazdani	Caolinita	Gasóleo (0%-16%)	Pasa de 26% a 22.5%
2013	Walia, B.S; Singh, G; Kaur, M	CL-ML	Diésel (0%-12%)	Pasa de 20.83% a 32.12%
2012	Tong, Ling; Chen, Weisheng; Zheng, Xilai; Li, Mei	Loamclay	Diésel (0%-20%) Petróleo crudo (0%-16%)	Pasa de 19.1% a 8% (diésel) Pasa de 19.1% a 14% (petróleo crudo)

Fuente: Elaboración de la autora.

En la Tabla 5 se presentan los resultados respecto al índice de plasticidad, representado como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del suelo, donde se reportan casos de estudio en los cuales el hidrocarburo no tiene influencia en esta propiedad y otros donde los aumentos son significativos. Esto pone de manifiesto la variabilidad que se presenta en los límites de Atterberg dependiendo del tipo de hidrocarburo y las propiedades propias de los suelos investigados, por tanto, todo cambio en el suelo debe ser estudiado para comprender la afectación que se podría presentar en obras existentes o futuras.

Tabla 5. Resultados de las investigaciones respecto al índice de plasticidad

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Resultado
2016	Hang Lian Bian, Song-yu Liu, Guo-jun Cai, Ya chu	Arcilla lodosa-limosa	Diésel (4%-12%)	Pasa de 15.7% (diésel 4%) a 15.6 (diésel 12%)
2016	Sayed Alireza Nasehi; Ali Uromeihy; Mohammad Reza Nikudel; Ali Morsali	CL ML	Gasóleo (0%-9%)	Pasa de 25% a 24.5% (CL) Pasa de 9% a 8.5% (ML)
2015	Ransome Daka, Miebaka	60% Arena con 10% bentonita y 30% caolinita	Aceite para motores (0%-7.1%)	Pasa de 35% a 42%
2015	Ransome Daka, Miebaka	60% Arena con 30% bentonita y 10% caolinita	Aceite para motores (0%-7.1%)	Pasa de 101% a 111%
2015	Echeverry et al.	Residual tropical	Gasolina	Pasa de 18% a 15%
2015	Joseph, Jesna; G Hari	Suelo laterítico Suelo arenoso Suelo arcilloso	Suelo laterítico: Diésel (0%-22%) Suelo arcilloso: Diésel (0%-35%)	Pasa de 33.6% a 33% (suelo laterítico) Pasa de 51% a 35% (suelo arcilloso)
2015	LIU Zhi-bin, LIU Song-yu, CAI Yi	Caolinita	Diésel (0%-20%)	Pasa de 16% a 18%
2014	Huang, Fa-Xing; Lu, Hai-Jun	Arcilla	Petróleo crudo (0%-12%) Diésel (0%-12%)	Pasa de 22.3% a 29.4% (petróleo crudo) Pasa de 22.3% a 23.2% (diésel)
2014	Z. N. Rasheed, F. R. Ahmed y H. M. Jassim	SP-SM	Keroseno (0%-7.5%) Gasóleo (0%-7.5%)	Pasa de 4.3% a 2.72% (Gasóleo) Pasa de 4.3% a 3.15% (Keroseno)
2014	Akinwumi I.I., Diwa D y Obianigwe N	Suelo laterítico	Petróleo crudo (0%-10%)	Pasa de 18% a 32%
2014	Solly, George; EA, Aswathy; Sabu, Berlin; NP, Krishnaprabha; George, Maria	SM	Diésel (0%-12%)	Pasa de 2.63% a 1.5%

Tabla 5. Continuación

2014	Pandey, Annu; Bind, Y.K	Suelo aluvial 40.3% arena 27.78% limo 31.92% arcilla	Petróleo (0%-16%)	Pasa de 13% a 3%
2014	Zárate, Yanet Antonio	CH	Diésel (0%-30%)	Pasa de 38.33% a 39%
2013	Walia, B.S; Singh, G; Kaur, M	CL-ML	Diésel (0%-12%)	Pasa de 6.22% a 4.66%
2013	Elahe Khosravi, Hasan Ghasemzadeh, Mohammad Reza Sabour, Hessam Yazdani	Caolinita	Gasóleo (0%-16%)	Pasa de 19% a 20%
2012	Tong, Ling; Chen, Weisheng; Zheng, Xilai; Li, Mei	Loamclay	Diésel (0%-20%) Petróleo crudo (0%-16%)	Pasa de 17.3% a 18% (diésel) Pasa de 17.3% a 27.9% (petróleo crudo)

Fuente: Elaboración de la autora.

Respecto al límite de contracción son pocos los casos de estudio que se encuentran en la literatura. En la Tabla 6 se presentan los resultados de esta propiedad índice, donde se observa que la reducción no es significativa.

Tabla 6. Resultados de las investigaciones respecto al límite de contracción

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Resultado
2014	Pandey, Annu; Bind, Y.K	Suelo aluvial 40.3% arena 27.78% limo 31.92% arcilla	Petróleo (0%-16%)	Pasa de 17.3% a 16.1%
2014	Solly, George; EA, Aswathy; Sabu, Berlin; NP, Krishnaprabha; George, Maria	SM	Diésel (0%-12%)	Pasa de 21.4% a 20.7%

Fuente: Elaboración de la autora.

1.2.4 Clasificación de los suelos.

La clasificación del suelo se realiza con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), un sistema que establece una división sistemática de los diferentes tipos de suelo de acuerdo con sus características físicas y propiedades geomecánicas. La clasificación divide a los suelos en granulares (gravas y arenas) que tienen tamaños de partícula mayores a 0.0075 mm y finos (limos y arcillas) para menores a 0.0075 mm; en el caso de los finos según los valores de los límites de Atterberg pueden clasificarse de alta o baja compresibilidad.

Esta clasificación permite agrupar diferentes materiales y correlacionar algunas de sus propiedades mecánicas, las cuales definirán su comportamiento ingenieril. Son pocas las investigaciones en donde se ha analizado la variación en la clasificación del suelo al tener presencia de hidrocarburos, puesto que se han centrado en el estudio de las propiedades geomecánicas y los límites de Atterberg.

Para lograr esta identificación se requiere clasificar el suelo sin contaminante como una medida de referencia para evaluar si hay transformación en el suelo ante la presencia del hidrocarburo (Akinwumi et al., 2014, p. 6) y por tanto, esto cómo podría variar el uso de estos suelos para propósitos de ingeniería.

Un estudio reciente a un suelo de arcilla y limo con presencia de diésel reporta modificación del tamaño de las partículas, pues el diésel interactúa con las partículas del suelo reduciendo su tamaño, con lo cual se incrementó el contenido de partículas tamaño arcilla (Bian et al., 2016). Sin embargo, no se reporta cambio en la clasificación del suelo, pero se evidencia que entre más tiempo el hidrocarburo tenga interacción con el suelo las partículas tienden a ser más finas. Esto permite inferir que, a grandes concentraciones de diésel y largos periodos de exposición, el suelo podría llegar a cambiar su clasificación por tener más partículas finas. Adicionalmente, un estudio realizado en Nigeria a suelos lateríticos contaminados con petróleo crudo muestran la reducción de la cantidad de partículas tamaño arcilla, lo cual incrementa falsamente el tamaño de las partículas por la interacción con el petróleo crudo debido a la formación de estructuras floculadas (Ukpong & Umoh, 2015).

1.2.5 Estructura mineralógica.

La estructura mineralógica identifica los minerales formadores del suelo, estableciendo su comportamiento físico-químico. Para su determinación se hace uso del ensayo de difracción por rayos X (DRX), este ensayo se ha utilizado en varias investigaciones. Por ejemplo, en un estudio de una muestra de arcilla caolinita se utilizó el ensayo de DRX para identificar y caracterizar la composición de caolinita (Khosravi et al., 2013); en otro estudio, de un suelo residual tropical del batolito antioqueño se utilizó el ensayo de DRX para identificar los minerales presentes en el suelo de estudio (Echeverri et al., 2015), como se observa en la Tabla 7. Respecto a la estructura del suelo se han realizado algunas investigaciones, Tabla 7; un estudio de un suelo arcilloso con diésel reporta la disminución en el empaquetamiento de las partículas de arcilla y microagregados, desintegración de parte de los microagregados, deformación de las esquinas y bordes de las partículas de arcilla (Izdebska-Mucha & Trzciński, 2008). Así mismo, un estudio de una caolinita con diésel reporta que a mayor contenido del hidrocarburo se aumenta la capacidad del agua para formar una estructura floculada de caolinita. Por lo tanto, los hidrocarburos pueden aumentar la capacidad del agua para formar fábricas floculadas por partículas finas (Nasehi et al., 2016).

Tabla 7. Resultados de las investigaciones acerca de la composición mineralógica y estructura del suelo

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Suelo sin hidrocarburo	Suelo con hidrocarburo
2015	Echeverry et al.	Residual tropical	Gasolina	Cuarzo, caolinita y gibsita.	Cuarzo, aumenta caolinita y hematita; disminuye gibsita.
				Se observa menor agregación de las partículas y menos poros visibles.	Se observa mayor agregación de las partículas. Poros más visibles.

Tabla 7. Continuación

2015	Sayed Alireza Nasehi; Ali Uromeihy; Mohammad Reza Nikudel; Ali Morsali	CL ML	Gasóleo		Estructuras floculadas por partículas finas.
2013	Elahe Khosravi, Hasan Ghasemzadeh, Mohammad Reza Sabour, Hessam Yazdani	Caolinita	Gasóleo		Estructuras floculadas.
2008	Izdebska-Mucha, Dorota; Trzciński, Jerzy	Suelo glacial 1% grava, 53% arena, 25% limo, 21% arcilla	Diésel		Fracción arcillosa: pérdida del empaquetamiento, desintegración de los microagregados y comienza a ser más isotrópica.

Fuente: Elaboración de la autora.

A nivel macroscópico es importante considerar las características de las partículas del suelo, pues la modificación en la distribución del tamaño de las partículas influye en el comportamiento del suelo bajo cargas como edificios, presas y carreteras (Ukpong & Umoh, 2015). En relación con lo anterior, en un estudio a un suelo residual tropical del batolito antioqueño con presencia de gasolina se realizó un análisis con microscopio, encontrándose que la presencia de gasolina en el suelo generaba más poros visibles en su estructura, lo cual afectaba las propiedades índice del suelo (Echeverri et al., 2015).

1.2.6 Resistencia a la compresión inconfiada del suelo.

El ensayo de resistencia a la compresión inconfiada se realiza a suelos cohesivos con el objeto de conocer el valor de la resistencia o esfuerzo último bajo condición de compresión sin confinamiento. Los resultados de las investigaciones referentes a esta propiedad se encuentran en la Tabla 8, se observa que en la mayoría de los casos disminuye la resistencia. Se debe tener en cuenta que todo cambio en esta propiedad afecta directamente la seguridad y economía dentro del diseño de las obras de ingeniería.

Tabla 8. Resultados de las investigaciones acerca de la resistencia a la compresión inconfiada de suelos cohesivos

Año	Autor	Tipo de suelo estudiado	Hidrocarburo	Resultado
2015	LIU Zhi-bin, LIU Song-yu, CAI Yi	Caolinita	Diésel (0%-20%)	Pasa de 483 KPa a 27.1 KPa a los 28 días de curado Pasa de 483 KPa a 72.76 KPa a los 210 días de curado
2015	Sayed Alireza Nasehi; Ali Uromeihy; Mohammad Reza Nikudel; Ali Morsali	CL ML	Gasóleo (0%-9%)	Pasa de 130 KPa a 108 KPa (CL) Pasa de 80 KPa a 20 KPa (ML)
2014	Ochepo, J.; Joseph, V	Suelo laterítico estabilizado con 8% de limo	Aceite para motores	Pasa de 90 KPa a 105 KPa a los 7 días de curado Pasa de 90 KPa a 225 KPa a los 14 días de curado Pasa de 50 KPa a 410 KPa a los 28 días de curado
2014	Solly, George; EA, Aswathy; Sabu, Berlin; NP, Krishnaprabha; George, Maria	SM	Diésel (0%-12%)	Pasa de 17 KPa a 29 KPa

Tabla 8. Continuación

2013	Walia, B.S; Singh, G; Kaur, M	CL-ML	Diésel (12%)	Pasa de 140.96 KPa a 33.25 KPa
2013	Zheng Tianyuan, Yang Junjie, Li Yongxia, Liu Jiangjiao	No reporta	Diésel	Disminuye

Fuente: Elaboración de la autora.

Después de haber presentado los resultados de las investigaciones que se han realizado a nivel mundial se puede analizar que:

- El contenido de humedad natural tiene escasos estudios, no obstante, se reporta la complejidad en su determinación por la composición de las muestras, donde por el secado se presenta evaporación del hidrocarburo, pero también quedan algunos de sus compuestos remanentes en estado sólido.
- La gravedad específica de los sólidos se mantiene constante o disminuye, esta última se presenta en la mayoría de los casos de estudio; esto indica que el hidrocarburo disminuye el peso de la fracción sólida del suelo por la degradación de las partículas.
- Los hidrocarburos modifican los límites de Atterberg, el aumento o disminución depende del porcentaje de hidrocarburo, tipo de hidrocarburo y tipo de suelo estudiado. Lo cual indica que esta propiedad deberá seguir siendo estudiada, para tener un indicio de los cambios en el comportamiento del suelo y sus propiedades a través de la realización de ensayos de laboratorio.
- La clasificación de los suelos es un tema de bastante interés puesto que permite definir los usos de estos suelos en las obras civiles; sin embargo, aun cuando el tamaño de las partículas se modifica, la clasificación del suelo no ha sido alterada. No obstante, es importante continuar investigando esta característica, pues se

podría tener el escenario del cambio en la clasificación del suelo, lo cual impactaría su uso en obras civiles existentes o futuras.

- Los estudios de la estructura y composición mineralógica evidencian cambios en los suelos con presencia de hidrocarburos, lo cual permite explicar el cambio en las propiedades geotécnicas de los suelos.
- La resistencia a la compresión inconfiada en la mayoría de los casos de estudio disminuyó con el incremento en el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo, esto pone de manifiesto que los suelos pierden resistencia afectando el diseño de las obras civiles y haciéndolos más susceptibles a fallar para determinados niveles de carga. Así mismo, al estar la resistencia al corte del suelo en función de la resistencia a la compresión inconfiada, su modificación producto de la interacción del hidrocarburo con las partículas del suelo puede influir en la estabilidad de las laderas, los taludes, etc.

1.3. Propuesta de Investigación

De acuerdo con el numeral 1.2 se evidencia que el comportamiento y propiedades geotécnicas del suelo varían según el hidrocarburo, porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo y el tipo de suelo, por tanto, se pretende investigar si hay cambios en las propiedades geotécnicas de los suelos finos con presencia de diésel en Colombia.

En consecuencia, la única forma de determinar los cambios en las propiedades geotécnicas de los suelos sometidos a contaminantes líquidos es por medio de ensayos de laboratorio, donde se controlan las variables del proceso y se comparan los resultados de las muestras con presencia de hidrocarburo y las muestras sin hidrocarburo (Echeverri et al., 2015).

Capítulo II. Problema de Investigación

En este capítulo se presenta una breve explicación acerca de los hidrocarburos, la producción a nivel mundial e indicadores de derrames en Colombia para contextualizar la pregunta de investigación: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y composición mineralógica de los suelos finos cuando hay presencia de diésel?

Partiendo de esta pregunta se enuncian los objetivos, la razón de ser de la investigación junto con las limitaciones asociadas, de tal forma que el lector comprenda la contribución de esta línea de investigación a la ingeniería geotécnica colombiana.

2.1. Planteamiento del Problema

2.1.1 Los hidrocarburos.

El petróleo está formado por hidrocarburos cuya estructura molecular se basa en carbono e hidrógeno, según el ordenamiento de sus átomos se obtienen diferentes propiedades físicas y químicas. Su aprovechamiento como medio energético se realiza separándolo en fracciones donde se obtienen diferentes tipos de combustibles como el gasavión, gasolina, turbosina, diésel, gasóleo ligero y gasóleo pesado (Chow Pangtay, Susana, 1998).

En las refinerías se realiza el proceso de separación con torres de destilación primaria, donde la última fracción del proceso corresponde al gasóleo que contiene de 15 a 18 átomos de carbono, de este se obtiene el diésel (Chow Pangtay, Susana, 1998). El diésel contiene compuestos parafínicos, naftalénicos y aromáticos, de 10 a 22 átomos de carbono; su contaminante más importante es el azufre.

Una de las formas para estar los hidrocarburos presentes en el suelo es a través de los derrames. Los derrames son un tipo de contaminación que se presenta por vertimiento o fugas durante el transporte en carreteras o sistemas ferroviarios,

almacenamiento en estaciones de servicio o a lo largo de las redes de conducción; estos pueden ser accidentales o provocados.

Huaiquilaf (2008, p. 22) menciona que el proceso de transporte en el suelo de los hidrocarburos ligeros, denominados así porque tiene una densidad menor a la densidad del agua, como la gasolina o el diésel se condicionan por:

- Las propiedades del hidrocarburo: densidad, viscosidad, solubilidad, presión de vapor, volatilidad y tensión interfacial.
- Las características del suelo: fuerzas de capilaridad, distribución del tamaño de los poros, contenido de humedad inicial, composición mineralógica y velocidad del agua en la zona vadosa.
- Saturación residual y permeabilidad relativa.
- Preferencia de transporte por las fracturas o canales de disolución.

Por ejemplo, en la Figura 2 se observa el transporte de hidrocarburos ligeros producto de una fuga en un sistema de distribución, donde por efecto de la fuerza de la gravedad el hidrocarburo infiltra en el suelo, quedando retenido en los poros y fracturas debido a las fuerzas de capilaridad. Esta retención corresponde a la adsorción del hidrocarburo por las partículas del suelo, por tanto, la estructura del suelo tendrá una fase sólida, agua, hidrocarburo y aire, fases que interaccionan y condicionan las propiedades del suelo.

El hidrocarburo que no queda retenido continuará avanzando en profundidad hasta encontrar el nivel freático, donde cesará su transporte en profundidad, pero se dispersará lateralmente. En la medida que los derrames tienen gran volumen y son constantes con mayor facilidad se moverá el hidrocarburo en la estructura del suelo, y si se tiene en cuenta que los suelos arcillosos de baja permeabilidad no saturados se comportan en ocasiones como sistemas de fracturamiento, esto facilitaría el transporte de los hidrocarburos, Figura 3.

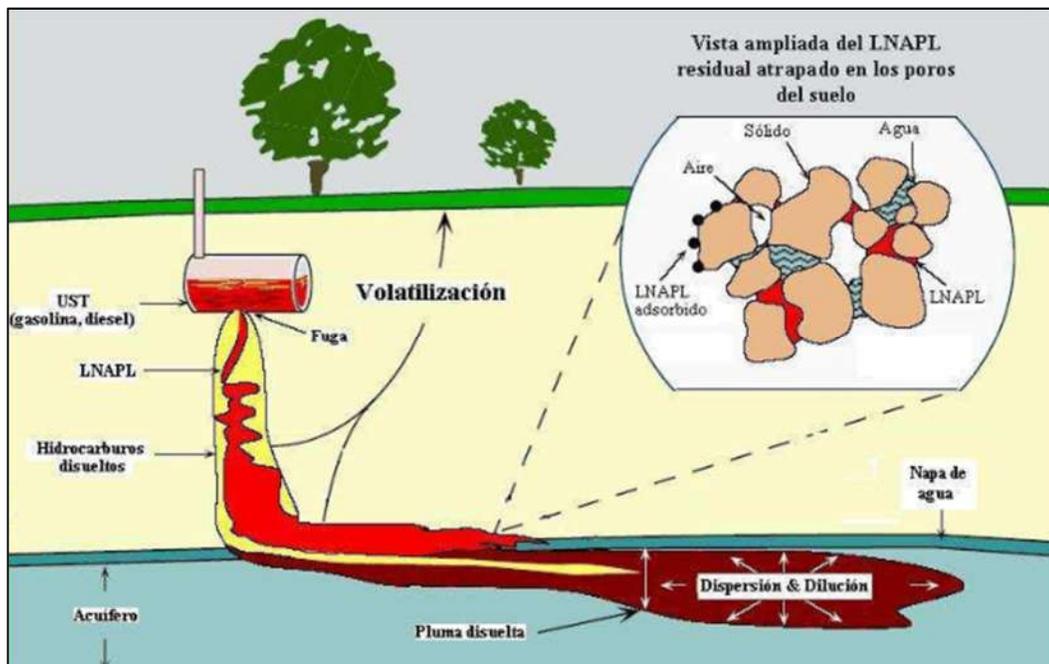


Figura 2. Transporte de hidrocarburos ligeros en el suelo producto de una fuga.
 Fuente: (Huaiquilaf, 2008, p. 23)

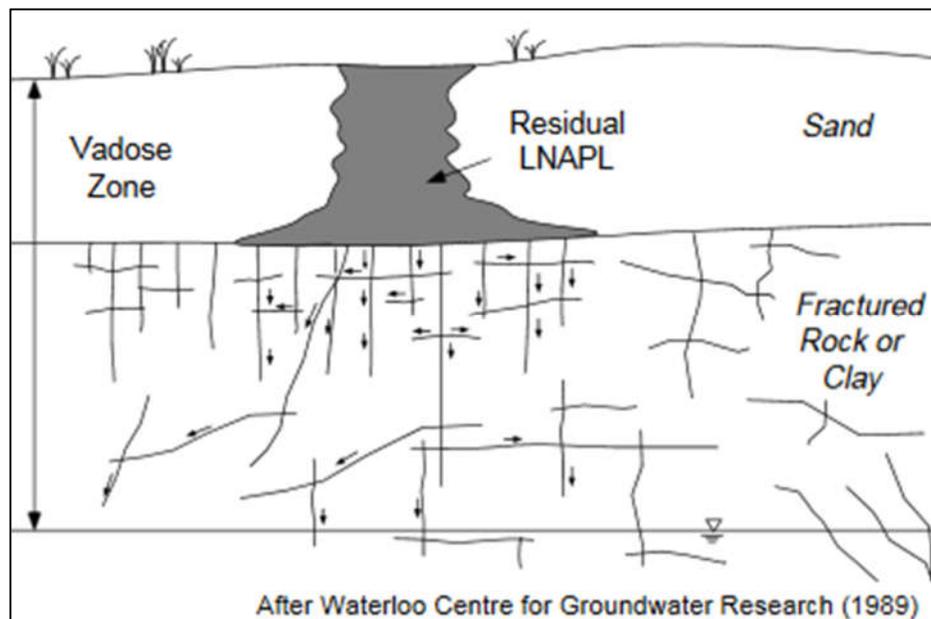


Figura 3. Transporte de hidrocarburos ligeros en un suelo fracturado. Fuente:
 (Newell et al., 2015, p. 8)

Cabe agregar que la persistencia de los hidrocarburos en el suelo aumenta en cuanto más pequeño es el tamaño de las partículas puesto que aporta mayor área superficial (Brito, Lema y García 2003, p. 89), debido a ello la importancia de estudiar los cambios en las propiedades de los suelos finos.

2.1.2 Producción de hidrocarburos a nivel mundial.

Los estudios de los derrames de hidrocarburos en el suelo se han realizado a nivel físico-químico y de recuperación edafológica (Zárate, 2014), sin embargo a nivel de las propiedades geotécnicas los estudios son pocos, centrándose en Asia por su nivel de producción petrolera y la masificación de las redes de transporte.

En el Anexo 1 se encuentra la distribución de la producción de petróleo, líquidos refinados del gas natural y todas las materias primas refinadas en el mundo, en el periodo comprendido entre diciembre de 2012 y diciembre de 2015. Se aprecia que Asia y Oceanía son los principales continentes donde se produce petróleo y refinados, seguidos por Europa y América. Todos presentan en común una tendencia ascendente en la producción de hidrocarburos por la misma dinámica mundial de crecimiento, debido a esto la probabilidad de presentarse derrames es alta y el impacto en los suelos deberá ser investigado para determinar su influencia en las obras existentes y futuras.

2.1.3 Derrames en Colombia.

Los derrames en Colombia se pueden presentar durante el transporte o almacenamiento, en refinerías, sistemas de distribución, sistemas de almacenamiento y estaciones de servicio, con cualquiera de los productos de la canasta de combustibles (Figura 4), se observa que la mayor participación es del diésel con el 48%, seguido por la gasolina con el 24% y el jet fuel con el 8%.

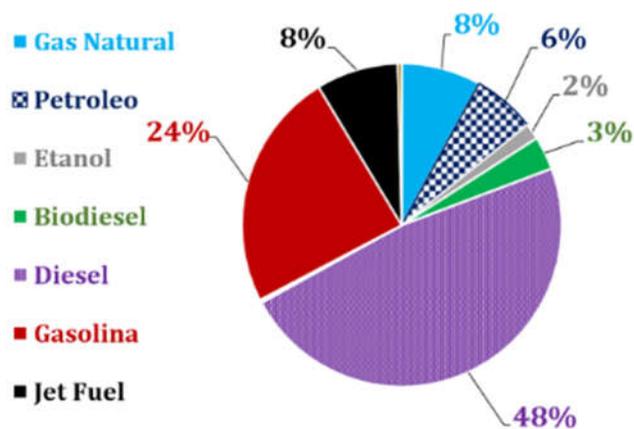


Figura 4. Canasta de combustibles en Colombia, 2012. Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2015)

Los derrames de hidrocarburos pueden ocurrir por accidentes durante el transporte en carreteras, fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción y por hurtos o atentados a la infraestructura. En relación con los hurtos de hidrocarburos en Colombia, la Tabla 9 evidencia una disminución cercana al 91% en el periodo comprendido entre 2006 y 2011; sin embargo, su cifra ha sido elevada en la última década y los sitios afectados ambientalmente son incalculables.

La Tabla 9 muestra el incremento en el volumen de crudo transportado, el cual se ha estimado en un 155.5% en el periodo comprendido entre 2006 y 2011, lo cual se explica por el aumento en la creación de redes de transporte de hidrocarburos para satisfacer las necesidades del país, esto se evidencia en la Figura 5. Este incremento condiciona la posibilidad de presentarse derrames o fugas de hidrocarburos que entrarían en contacto con el suelo.

Por último, la Tabla 9 muestra el aumento en el volumen transportado de los productos refinados, el cual correspondió a un 60% en el periodo comprendido entre 2006 y 2011, esto ratifica la dinámica creciente del sector petrolero en Colombia y la importancia de determinar el grado de sensibilidad de las propiedades de los suelos ante la presencia de hidrocarburos.

Tabla 9. Indicadores del volumen de los hidrocarburos transportados y los hurtos en Colombia

Indicador	Medida del indicador	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Volumen de crudo transportado	Miles de barriles por día calendario	471,1	516,6	542,3	576,2	770,9	1204
Volúmenes de refinados transportados	Miles de barriles por día calendario	180,7	193,8	209,5	223,5	264,9	289
Hurto de hidrocarburos	Barriles por día calendario	942	561	389	196	132	81

Fuente: («Transporte Indicadores», 2014)

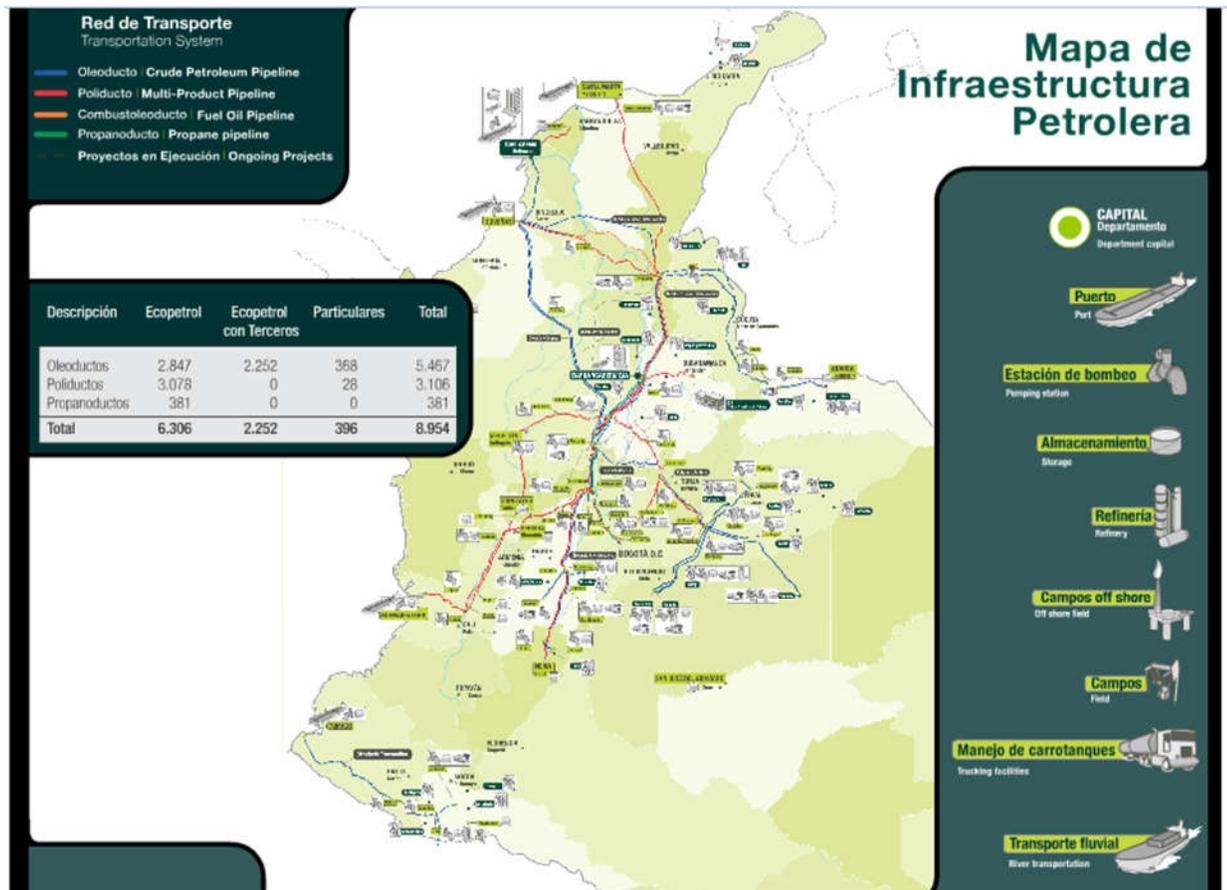


Figura 5. Mapa de la infraestructura petrolera. Fuente: («Mapa de Infraestructura Petrolera», 2016)

La realización de estudios en Colombia que demuestren si se producen o no cambios a nivel de la estructura, mineralogía y propiedades geotécnicas del suelo son escasos como se evidenció en el capítulo 1. La falta de investigación en este tema es de relevancia para el campo de la geotecnia que se encuentra en constante evolución, permitiendo presentar la magnitud de los cambios en los parámetros característicos del suelo al ser impregnado con hidrocarburos producto de los derrames, de ahí que se formule la pregunta de investigación: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y composición mineralógica de los suelos finos cuando hay presencia de diésel?

El diésel es elegido como el hidrocarburo para impregnar en los suelos finos que formaron parte del estudio de la presente investigación por ser el más consumido en Colombia, por los menores riesgos de manipulación en el laboratorio y por formar parte de los hidrocarburos ligeros, los cuales son la principal fuente de contaminación mundial que afecta la calidad del agua subterránea.

2.2. Objetivos de la Investigación

2.2.1 Objetivo general.

Comprobar los cambios en las propiedades geotécnicas de los suelos finos contaminados por diésel.

2.2.2 Objetivos específicos.

- Determinar los cambios en los límites de Atterberg de las muestras de suelo sin y con hidrocarburo.
- Clasificar las muestras de suelo sin y con hidrocarburo según el sistema unificado de clasificación de suelos (USCS).

- Determinar las relaciones gravimétricas y volumétricas de las muestras de suelo sin y con hidrocarburo.
- Caracterizar y analizar si hay cambios en la composición mineralógica de las muestras de suelo sin y con hidrocarburo.
- Determinar los cambios en la resistencia a la compresión inconfiada de las muestras de suelo sin y con hidrocarburo.

2.3. Justificación de la Investigación

En Colombia la producción de investigaciones acerca de los cambios en el suelo a nivel geotécnico por derrames de hidrocarburos es escasa, debido a la hipótesis generalizada de que no le sucede nada al suelo, y por otra parte, no se considera un tema de interés dentro de los procesos constructivos. Sin embargo, al ser Colombia un país productor y consumidor de hidrocarburos amerita el desarrollo de investigaciones en este tema.

Por ejemplo, ¿qué sucede a nivel geotécnico en el suelo que ha sido afectado por derrames en las estaciones de servicio o en las carreteras durante el transporte de los combustibles, etc.? Es una pregunta para darle respuesta, con el fin de determinar si el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo tendría un aspecto crítico para garantizar la calidad y óptimo comportamiento del suelo en las obras civiles existentes o futuras.

Por tanto, la finalidad de la presente investigación es contribuir a la generación de conocimiento e identificar si hay cambios a nivel geotécnico en los suelos finos con presencia de diésel, dejando un punto de partida para otras investigaciones en esta línea.

2.4. Limitaciones de la Investigación

Los suelos finos incluyen arcillas y limos, no obstante, la investigación se limitó a suelos arcillosos de diferentes características, esto debido a que dentro del proceso de búsqueda del material de experimentación en los tiempos fijados en el cronograma solo se obtuvo respuesta de tres (3) laboratorios, laboratorios que solo contaban con arcillas de acuerdo a los requerimientos realizados; si bien no se conoce el lugar de procedencia, profundidades y demás especificaciones por confidencialidad de los laboratorios, se garantizó que las muestras ensayadas para cada tipo de suelo fueran homogéneas en su grupo debido a que fue uno de los requerimientos que se realizó a los laboratorios, de tal forma que los resultados de los tratamientos fueran comparables entre las muestras.

Dentro de la investigación no se evaluaron los cambios en la conductividad hidráulica, pH y demás parámetros que no se encuentran dentro de las propiedades índice de los suelos. Cualquier cambio a nivel superficial en las muestras producto de la interacción con el diésel no fue investigado en esta tesis, pero se dejará planteado para futuros investigadores.

No se evaluó la tasa de infiltración del diésel en las muestras de suelo debido a que el planteamiento de la investigación considera que el diésel ya está en la estructura del suelo, así mismo el estudio de la forma en la que llegó el hidrocarburo al suelo se deja planteado para futuras investigaciones porque no formaba parte del alcance de la tesis.

No se determinó la sensibilidad de las arcillas puesto que no se trabajó con muestras en estado natural sino en condición alterada, para fines de preparación de las muestras para el proceso de impregnación de diésel.

Los ensayos de laboratorio estuvieron sujetos a los requerimientos y procedimientos de las normas INVIAS, por tanto, las ecuaciones experimentales propuestas por algunos investigadores para la determinación del contenido de humedad en el suelo cuando hay presencia de hidrocarburo, donde se debe calcular el porcentaje remanente y el porcentaje evaporado no fueron investigadas.

Es preciso señalar que, dentro del alcance de la tesis se encuentra analizar el efecto de la temperatura en las muestras que tenían presencia de hidrocarburo, es decir, si se desconoce que hay hidrocarburo en el suelo las muestras se ensayaron a 110 ± 5 °C; por el contrario, si se conoce de la presencia de contenido orgánico (hidrocarburo), las muestras se ensayaron a 50 ± 5 °C. Por lo tanto, las muestras de suelo sin diésel no fueron ensayadas a 50 ± 5 °C cumpliendo con los lineamientos de la normatividad, es decir, no tenían suficiente contenido orgánico para ser sujetas a este ensayo, luego la influencia de la temperatura en las propiedades índice de las muestras de suelo sin diésel no fue investigada y se deja planteada para futuras investigaciones.

Los cambios a nivel de componentes químicos en las muestras no fueron investigados por la volatilidad del hidrocarburo, sumado a que la técnica de fluorescencia por rayos X (FRX) requiere de un proceso de secado de las muestras a 105°C, temperatura que afecta el proceso de evaluación de los cambios químicos en las muestras por las características propias de los elementos químicos que componen el diésel y las muestras de suelo.

No se analizaron las muestras a nivel macroscópico puesto que se requería de un microscopio electrónico de barrido, con el cual no se contaba. Dentro de los microscopios estereoscopios disponibles, se requería que la muestra tuviera un tamaño de granos muy fino y aplicar un colorante, procedimiento que no garantizó poder observar y detectar cambios en la distribución del tamaño de granos porque solo se obtenían 10X, por estas razones la investigación no evaluó los cambios a nivel macroscópico.

La determinación de los diagramas de fase se realizó con base en los resultados de laboratorio, donde el peso unitario total de la muestra control se tomó como parámetro de comparación; la gravedad específica de los sólidos y el contenido de humedad de cada unidad experimental se tomaron de los resultados de laboratorio. Sin embargo, no fue posible determinar experimentalmente y con una expresión matemática la participación del diésel en el contenido de humedad que se determinó en el laboratorio, esto debido a la interacción que se presentó con el agua y que durante el proceso de secado en horno se presentan pérdidas por evaporación y

parte del diésel puede quedar remanente en la fracción sólida del suelo, por ello su cuantificación no fue posible. De esta forma, los diagramas de fase se elaboraron tomando el porcentaje teórico del tratamiento de diésel para cada muestra como peso del suelo seco y haciendo uso del valor de su densidad teórica.

Capítulo III. Marco Teórico

A lo largo del capítulo se expone brevemente el sustento teórico de la investigación. Se inicia por una descripción de los diferentes grupos de los minerales de arcilla y sus procesos de formación, seguidamente se introducen las técnicas de identificación mineralógica para los suelos finos, en este caso corresponde al análisis de difracción de rayos X, evidenciando que las características físicas y químicas influyen la estructura de los suelos.

Posteriormente se encuentra una síntesis de las propiedades geotécnicas de interés para esta investigación junto con la referencia de las normas de ensayo aplicables en Colombia; finalizando con una introducción al transporte de hidrocarburos en el suelo, las variables que influyen dicho comportamiento y la interacción química que se produce entre los minerales de arcilla y los hidrocarburos (compuestos orgánicos).

3.1. Minerales de las Arcillas

Las arcillas se definen desde la mineralogía como un conjunto de minerales, que en la mayor parte son filosilicatos, con diámetro de las partículas inferior a 2 μm , su estructura es función de las propiedades físicas y químicas de los minerales constituyentes (Romero & Barrios, 1998, p. 3).

En general, los suelos están conformados por diferentes minerales, en algunos casos se tiene un mineral predominante, por ejemplo, el cuarzo que es un mineral muy común en el suelo y se forma completamente por silicio y oxígeno (SiO_2). Este mineral forma enlaces silicio-oxígeno muy fuertes, razón por la cual es duro, resistente a la meteorización y no evidencia exfoliación.

En el caso de los minerales de arcilla son partículas muy pequeñas presentes en el suelo resultado de la meteorización de los feldspatos, micas, anfíboles y piroxenos. Estos minerales se transforman en minerales de arcilla por procesos físicos y químicos o por descomposición, con la posterior cristalización.

Los factores más influyentes son la eficiencia de la lixiviación, el pH y el tiempo. Un ejemplo de estos factores son: la roca que da origen al mineral, el clima, la topografía, la cubierta vegetal y el tiempo durante el cual se produce la meteorización, los cuales son claves en el proceso de formación no solo del mineral sino de los óxidos de hierro y aluminio (Ahmed, 1985, p. 7).

En la Figura 6 se presenta un esquema desarrollado por Buckman y Brady (1969) con las condiciones de formación de algunos minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio. La clorita e illita se desarrollan al inicio de la meteorización, seguidas por la vermiculita, montmorillonita y al final se desarrolla la caolinita.

La illita se forma por alteración de la moscovita o de minerales como los feldespatos potásicos, debido a la recristalización por la abundancia de potasio; pero se pueden formar a partir de la montmorillonita cuando entra en contacto con la cantidad requerida de potasio.

La clorita se forma por alteración del magnesio o de las micas y biotitas con gran cantidad de hierro, sin embargo, se presenta pérdida de algunos iones de hierro.

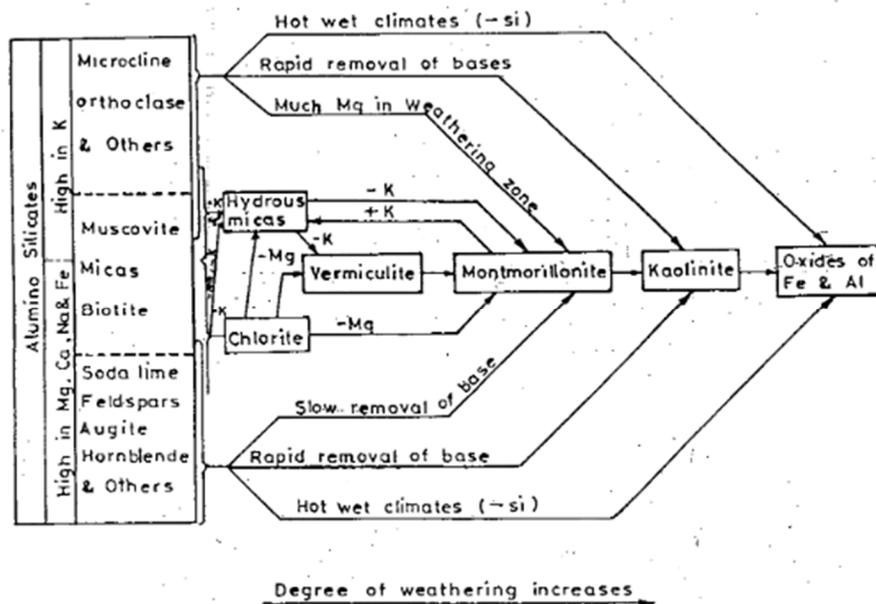


Figura 6. Condiciones de formación de algunos minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio. Fuente: (Ahmed, 1985, p. 8)

Los principales grupos de los minerales de arcilla incluyen: caolinita, illita, montmorillonita y paligorskita (Al-Khafaji & Andersland, 1992, p. 10). La mayoría de los minerales de arcilla se comportan plásticamente al agregarles una cantidad limitada de agua, esto debido al valor elevado del área superficial respecto al tamaño de la partícula (Mitchell, 1976, p. 27). El valor elevado del área superficial se debe al pequeño tamaño de la partícula, su morfología laminar y las sustituciones isomórficas (Romero & Barrios, 1998, p. 8). Debido a su gran superficie específica tienen una carga residual negativa, en la Tabla 10 se presentan algunos valores típicos de la superficie específica de algunos minerales de arcilla.

Tabla 10. Valores típicos de superficie específica de los minerales de arcilla

Mineral	Superficie específica
Caolinita de baja cristalinidad	Hasta 50 m ² /g
Halloisita	Hasta 60 m ² /g
Illita	Hasta 50 m ² /g
Montmorillonita	80-300 m ² /g
Paligorskita	100-200 m ² /g

Fuente: (Romero & Barrios, 1998, p. 8)

La superficie de estos minerales tiene la característica de atraer las moléculas polares de agua por medio de enlaces débiles formando una capa de agua sobre el cristal, bajo esta condición se tiene un nuevo estado del material (Velde, 1995, p. 11). Los silicatos, cuarzos y calcitas exhiben este comportamiento. Algunas arcillas pueden incorporar el agua en su estructura generando arcillas expansivas, las cuales no son deseables en las obras de ingeniería.

La macroestructura en los depósitos de arcilla está representada por su estratificación; presencia de fisuración producto de grandes esfuerzos, inestabilidad del terreno o periodos de desecación; raíces o algún tipo de materia orgánica. Es importante identificar estas características para propósitos de ingeniería puesto que la resistencia es una de las variables más afectada (Berry & Reid, 1993, p. 17).

La estructura de los minerales de arcilla es función de las características químicas, arreglo geométrico de los átomos junto a los iones presentes en el mineral y las fuerzas eléctricas predominantes. La estructura base de estos minerales está constituida por silicio y oxígeno, elementos químicos con gran presencia en la tierra, que conforman un tetraedro (Barton & Karathanasis, 2002, p. 187).

Los minerales de arcilla se encuentran divididos según su estructura y características químicas en (García García, 1997, p. 5):

- Caolín: son silicatos 1:1 (bilaminares) donde la capa octaédrica comparte oxígenos con una capa tetraédrica, su estructura se basa en láminas de sílice cuya fórmula química es $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{-2}$ unidas a láminas de gibbsita, $(\text{Al}_2(\text{OH})_4)^{-2}$. En este grupo se encuentran los minerales nacrita, dickta, caolinita y halloysita. Este mineral se produce por la meteorización de los feldespatos, son eléctricamente balanceados por lo que su capacidad de adsorber iones es inferior respecto a otros minerales (Al-Ani & Sarapää, 2008, p. 2). Es un mineral muy común en el suelo, con cristales de diámetro efectivo de 0.2 a 2 μm . Sus unidades estructurales se encuentran unidas en el plano basal a través de enlaces de hidrógeno entre los iones de oxígeno presentes en su hoja tetraédrica y los iones hidroxilo de la hoja octaédrica; a causa de este enlace se deben las bajas propiedades expansivas y de plasticidad de este mineral; su área superficial es pequeña por lo tanto tiene una capacidad de adsorción de cationes limitada, no obstante, la mayor parte de su capacidad de intercambio se asocia con la disolución de los grupos OH^- sobre las aristas de la arcilla, lo cual es función del pH. La adsorción de los compuestos orgánicos se limita a las superficies externas y a los bordes del mineral, donde las cargas de valencia producidas por la ruptura de los enlaces se estiman entre el 10%-20% del área cristalina. Así, la caolinita es una arcilla con baja actividad coloidal, exhibe plasticidad y cohesión, se contrae y tiene una baja expansión (Contreras et al., 2003).
- Montmorillonita: son estructuras de capa 2:1 (trilaminares), cuya capa unitaria es una hoja octaédrica que se encuentra entre dos hojas tetraédricas que comparte átomos de oxígeno con ellas. Es un mineral derivado de la

pirofilita cuya fórmula química es $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ y el talco, $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, formándose por procesos de sustitución. Por ejemplo, cuando el mineral es derivado de la pirofilita se sustituyen algunos átomos de aluminio por magnesio, hierro o litio; los átomos de silicio se sustituyen por aluminio.

En el caso de ser derivado del talco se sustituyen algunos átomos de silicio por aluminio, y los átomos de magnesio por aluminio o hierro. Este mineral se produce por la meteorización de los silicatos máficos y puede adsorber grandes cantidades de agua.

En la Tabla 11 se presenta de manera general ejemplos de minerales que se incluyen en este grupo.

Tabla 11. Ejemplo de minerales del grupo montmorillonita

Mineral	Fórmula química
Montmorillonita	$\text{Al}_{1-67}\text{Mg}_{0-33}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Nontronita	$\text{Fe}_2\text{Al}_{0-33}\text{Si}_{3-67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Beidelita	$\text{Al}_2\text{Si}_{3-67}\text{Al}_{0-33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Hectorita	$\text{Li}_{0-33}\text{Mg}_{2-67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Saponita	$\text{Mg}_3\text{Si}_{3-67}\text{Al}_{0-33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Fuente: (García García, 1997, p. 5)

Se expanden libremente por tener una carga de capa baja, exponiendo su superficie externa e interna, donde su área superficial aumenta y alrededor del 80% se debe a la superficie interna. La capacidad de intercambio catiónico de este mineral depende poco del pH. Este mineral tiene una alta actividad coloidal, exhibe alta plasticidad y cohesión, donde su potencial de expansión y contracción es muy alto (Contreras et al., 2003).

- Micas: son estructuras de capa 2:1 (trilaminares), este mineral tiene características similares al grupo de la montmorillonita, con la sustitución

entre el talco y la pirofilita y el respectivo balance de cargas. En la Tabla 12 se presenta de manera general ejemplos de minerales que se incluyen en este grupo.

Tabla 12. Ejemplo de minerales del grupo de las micas

Mineral	Fórmula química
Moscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Paragonita	$NaAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Flogopita	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
Margarita	$CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$
Biotita	$K(Mg,Fe)_3(SiAl)O_{10}(OH)_2$
Lepidolita	$K(AlLi_2)Si_4O_{10}(OH)_2$

Fuente: (García García, 1997, p. 6)

Es un mineral muy común en el suelo que proviene de la roca madre. Usualmente forman parte de las partículas de suelo que se han transformado parcialmente en minerales expandibles con una estructura de capa 2:1 (trilaminares), debido a ello se encuentran las micas intercaladas con otros minerales. El área superficial se limita a las superficies externas del mineral y es relativamente pequeña, no presenta superficie interna debido a que en presencia de agua los espacios interlaminares no se expanden, por ello no se expande y sólo son moderadamente plásticas. Este mineral ejerce un efecto importante en la estabilidad de los suelos (Contreras et al., 2003).

- Illita: son minerales con características similares a la moscovita, sin embargo, cuentan con menos potasio y más agua. Su composición es 3% a 7% potasio, 38% a 53% sílice y 9% a 32% de alúmina. Representa parte de la meteorización progresiva de los feldespatos en caolinita sin ordenamiento y de los silicatos félsicos.

- Clorita: son estructuras de capa 2:2 (tetralaminares), forman parte de los minerales derivados del talco, donde uno de los cuatro silicios se sustituye por un átomo de aluminio, esto genera una carga neta negativa que se balancea con una capa de brucita positiva, quedando la fórmula química como $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_6$. Este mineral es producto de la meteorización de los silicatos máficos. Tiene una presencia extensa en los suelos, una expansión limitada, su área superficial es reducida y por tanto la capacidad de intercambio catiónico es baja.
- Palygorskita: son estructuras de capa 2:1:1 (tetralaminares), constituida por minerales con cadenas dobles de silicio y oxígeno con iones de oxígeno al final, su fórmula química generalmente es $(OH)_2Mg_5Si_8O_{20} \cdot 8H_2O$.
- Vermiculitas: son estructuras de capa 2:1 (trilaminares), se pueden considerar una biotita o flogopita, donde el potasio se reemplaza por magnesio, su fórmula química generalmente es $Mg_3(Si_{3-30}Al_{0-70})O_{10}(OH)_2$. Este mineral cuando se calienta súbitamente a $500^\circ C$ expulsa rápidamente el agua intercapa generando la expansión de sus partículas de 20 a 30 veces el tamaño original; esta habilidad de adsorber agua no es repetitiva. Usualmente son el resultado de la intemperización o alteración hidrotérmica de las micas. Su capacidad de expansión es limitada y tiene una capacidad de intercambio catiónico mayor a la montmorillonita pero con menos expansión que esta, debido a que su carga de capa es más alta (Contreras et al., 2003).

Con base en lo anterior se evidencia que los minerales de las arcillas son complejos y variados, generalmente las propiedades de los suelos arcillosos difieren de los minerales puros que se describieron. Por ello se requiere de ensayos físico-químicos para la adecuada identificación de las propiedades de estos suelos. En la presente investigación se hará uso del ensayo de difracción de rayos X por el método del polvo, un método semicuantitativo para determinar las fases mineralógicas de cada una de las muestras usadas en la fase experimental.

2.1.1 Difracción de rayos X, DRX.

Los rayos X fueron descubiertos por Wilhem Conrad en 1895, cuando experimentaba con tubos de rayos catódicos en tubos de descarga cubiertos, encontrando la producción de una radiación X que generaba la fluorescencia en el material estudiado. Con este descubrimiento se revolucionó la cristalografía en 1912 por sugerencia de Max von Laue, permitiendo medir la distancia entre planos sucesivos de un cristal y la posición de sus átomos (Dana & Hurlbut, 1960, pp. 119-120).

Los rayos X tienen una longitud de onda inferior a la luz visible (7200 Å a 4000 Å) y se difractan en los planos atómicos de un cristal, permitiendo penetrar fácilmente en los minerales, sus longitudes de onda son del orden de 100 Å a 0.02 Å. Estos rayos se producen por el movimiento rápido de los electrones, los cuales chocan con los átomos del elemento en estudio. Los electrones orbitales de la estructura extranuclear del átomo impactados por los electrones generan un estado de excitación temporal por la pérdida de energía, después de ese estado de excitación el electrón orbital recupera su estado estable dentro del proceso, a esto se denomina radiación X.

Con el paso de los años se crearon diferentes métodos para determinar la radiación X como lo fueron el método de Laue, el método del cristal giratorio y el método del polvo. Este último surgió por la rareza de los cristales de muchos minerales que dificultaban la realización de los otros métodos; en este método la muestra se porfiriza finamente y se pone en una aguja de diámetro 0.2 mm - 0.3 mm en cualquier orientación dentro de una caja. Durante el ensayo se gira el haz de rayos X monocromático para asegurar la desorientación de todas las partículas, al incidir los rayos X en la muestra se producen difracciones que satisfacen la ley de Bragg, $n\lambda = 2d \sin\theta$. Este método es ampliamente usado en mineralogía como una técnica de identificación de la estructura de los minerales y cuenta con la ventaja de permitir identificar cambios en las composiciones químicas al medir los desplazamientos de las líneas de un diagrama de polvo de estructura conocida (Dana & Hurlbut, 1960, p. 136).

Con los nuevos avances tecnológicos este método fue mejorado y se creó el ensayo de difracción por rayos X con el método del polvo que utiliza como equipo el difractómetro de polvo de rayos X; este ensayo es ampliamente utilizado en la actualidad ya que es más rápido en tiempo y se obtienen buenos resultados.

Este ensayo consiste en formar un alambre delgado con el polvo del material a ensayar y ponerlo en una cámara que contiene una película fotográfica, un haz de rayos X con longitud de onda conocida se direcciona a la muestra generando pequeños arcos, la difracción de los rayos producida satisface la ley de Bragg con la cual se identifican los minerales. La información de los picos de la reflexión generada por la muestra se registra en una cinta de papel donde la altura de los picos es directamente proporcional a la intensidad de la reflexión que los generó.

Los cristales de los minerales de arcilla son extremadamente pequeños y su cristalización no es la mejor, debido a esto las reflexiones son amplias con intensidades bajas y las reflexiones medibles son pocas; sin embargo, con técnicas especiales para preparar las muestras y equipos de alta sensibilidad estos inconvenientes se superan.

El espaciamiento intercapa alrededor de 7 Å, 10 Å y 14 Å es muy común en los minerales. Los minerales del grupo caolín tiene reflexiones basales a 7.14 Å y 3.57 Å, reflexiones fuertes a 4.47 Å, 4.36 Å, 4.18 Å, 2.49 Å, 2.38 Å, 2.34 Å y 2.29 Å; los minerales del grupo montmorillonita tienen reflexiones entre 10 Å y 15 Å según la cantidad de agua intercapa; los minerales del grupo micas o halloysita hidratada tienen reflexiones alrededor de 10 Å, se diferencian por la secuencia de líneas, donde las micas tienden a orientarse paralelas a los planos basales mientras la halloysita por su estructura no muestra esta orientación (Brindley, 1952); los minerales 14 Å se presenta para esmectitas, vermiculitas y cloritas, para su diferenciación se requiere realizar ensayos con etilenglicol y tratamientos con calor a temperaturas hasta de 700 °C; por ejemplo, si se usan temperaturas de 400-600 °C la vermiculita disminuye las reflexiones a valores de 9.5 Å - 10.5 Å (este valor depende de los cationes intercapa), pero las cloritas solo se afectan a temperaturas entre 600-700 °C donde se deshidratan parcialmente y sus reflexiones aumentan de intensidad.

3.1.2 Doble capa difusa.

El concepto de la doble capa difusa implica comprender lo que sucede en las arcillas cuando entran en contacto con el agua. De acuerdo con Leoni (s. f.), inicialmente las moléculas de agua, las cuales son polares, se presentarán alrededor de las partículas de arcilla que están con carga negativa, para compensar las cargas eléctricas que estas presentan, Figura 7. Alrededor de las partículas de arcilla se tiene una fase líquida donde se generan unos cationes hidratados (cationes y agua dipolar), lo que se denomina doble capa difusa. Esta capa tendrá más o menos espesor según el tipo de arcilla: 1:1, 2:1 o 2:1:1; y de su composición química. Por ejemplo, la caolinita tiene una doble capa difusa que es menor a la mitad de su estructura laminar, por el contrario, la montmorillonita tiene una doble capa difusa hasta 20 veces mayor que su estructura, de ahí que tenga una gran plasticidad en relación con la caolinita.

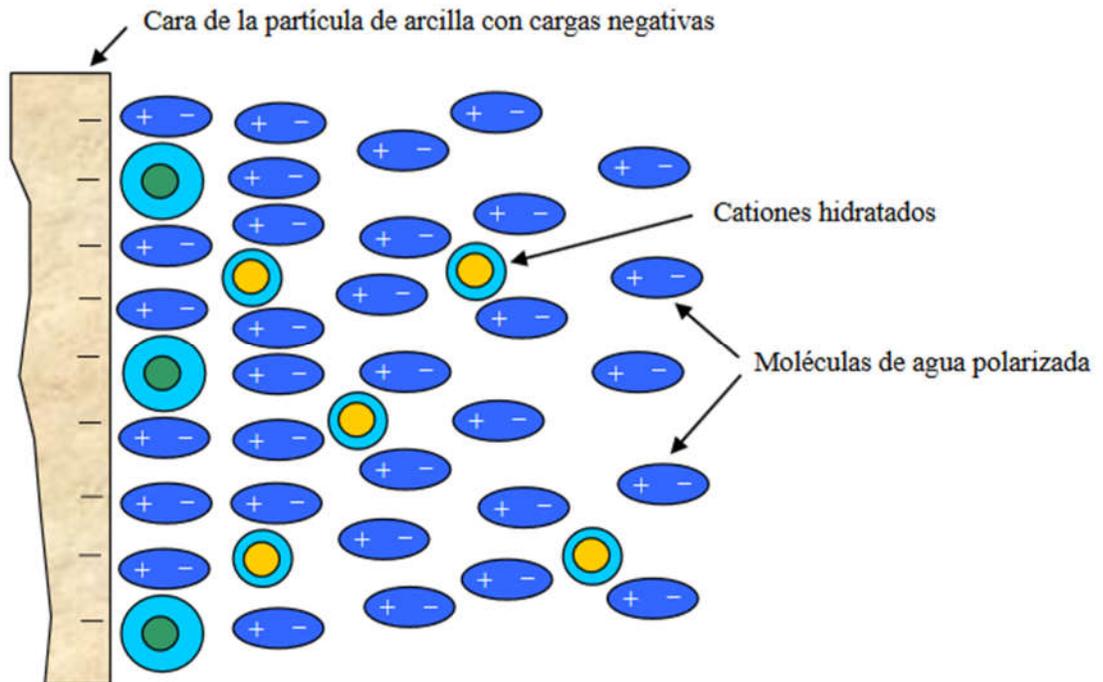


Figura 7. Interacción de las partículas de arcilla con las moléculas de agua. Fuente: (Leoni, s. f.)

De acuerdo con la teoría de la doble capa difusa, la concentración con la cual se retienen los cationes disminuye en la medida que estos se alejan de las partículas de arcilla como se observa en la Figura 8; se crean grandes fuerzas de atracción en la proximidad de las cargas negativas. Se tienen dos (2) zonas de atracción definidas: la primera corresponde a los cationes que son adsorbidos para formar una solución interna cerca de las partículas de arcilla; la segunda corresponde a los cationes que son más distantes y forman una solución externa. Respecto a la concentración de aniones, es inferior cerca de las cargas negativas de las arcillas y aumenta donde se forma la solución externa. Para las arcillas la doble capa difusa varía entre 100 Å y 200 Å, incluso puede llegar a 400 Å.

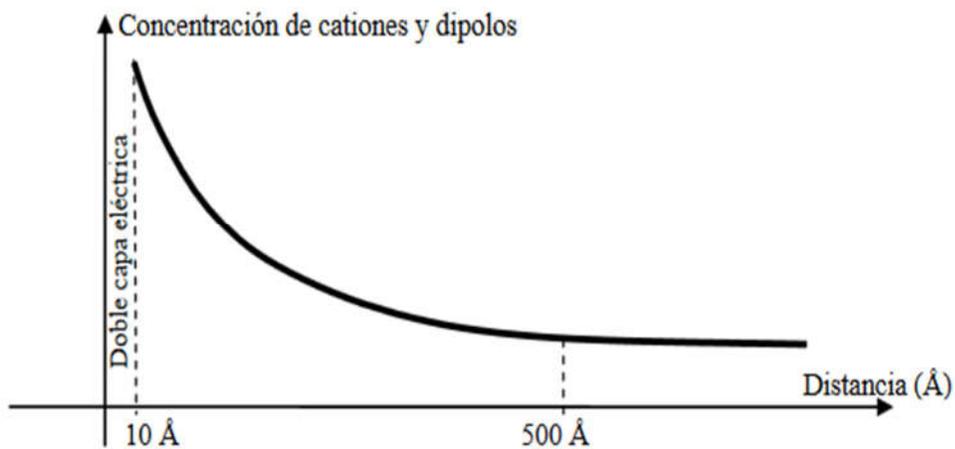


Figura 8. Comportamiento de la doble capa difusa con la cercanía a las partículas de arcilla. Fuente: (Leoni, s. f.)

Haciendo una analogía, cerca de la superficie de las partículas de arcilla el agua se comporta como un sólido (hielo), en la medida que se aleja se comporta como un líquido viscoso y cuando alcanza el exterior de la doble capa difusa se comporta como líquido.

3.1.3 Fenómeno de adsorción.

La adsorción es un fenómeno que se presenta en la superficie de los minerales, implica el cambio de concentración en la interface entre sólido y líquido, sólido y gas,

líquido y gas, estos cambios pueden ser con o sin reacción química; generalmente, son el resultado de las fuerzas de Van Der Waals, no obstante, si se establecen enlaces químicos dentro del proceso se denomina a este fenómeno quimisorción, donde se involucran altas tasas de energía. En los minerales de arcilla la adsorción se presenta en los bordes y caras de la superficie o entre las partículas de arcilla (Mielenz & King, 1952, p. 209). Este fenómeno reduce el desequilibrio de las fuerzas atractivas en la superficie del sólido, lo que implica un descenso de la energía libre del sistema (disminución de la entropía) y es una reacción exotérmica.

El área superficial y la carga de superficie de los suelos condicionan su reactividad. El área superficial se refiere a las dimensiones y forma de las partículas, en donde las partículas tamaño arcillas y la materia orgánica constituyen la mayor parte del área de los suelos.

Los minerales de arcilla adsorben cationes orgánicos e inorgánicos dependiendo de la capacidad de intercambio de cationes del mineral, expresado en miliequivalentes (meq) por 100 g de suelo seco, capacidad que es función de la estructura cristalográfica, sustituciones atómicas, distribución del tamaño de las partículas y el ordenamiento de los átomos; en otras palabras, la capacidad de intercambio catiónico es una medida equivalente del total de cargas negativas que tiene el mineral. Por ejemplo, los minerales de arcilla pueden adsorber cationes de Ca^{++} , Mg^{++} , H^+ , K^+ , HN_4^+ , entre otros, los cuales quedan retenidos en su superficie; sin embargo, estos pueden intercambiarse por otros iones de la disolución del suelo, de ahí que se denomine el proceso de intercambio catiónico. La capacidad de intercambio catiónico puede variar de 1 meq de iones por 100 g de suelo con textura gruesa hasta cientos de meq por 100 g de suelo que tenga proporciones considerables de silicatos laminares, por ejemplo, la vermiculita o la montmorillonita tienen elevados valores con respecto a la illita o la caolinita que presentan bajos valores.

Ahmed (1985) relaciona la naturaleza de intercambio de los iones con las propiedades físicas del suelo, particularmente la plasticidad. Las causas del intercambio catiónico en los minerales de arcilla son:

- En las unidades de silicio – aluminio se presenta rompimiento de los enlaces en sus bordes generando un desequilibrio, el cual se compensa con la adsorción de cationes. Por tanto, entre más pequeños sean los tamaños de las partículas del suelo y se tenga mayor distorsión, la capacidad de intercambio catiónico aumentará.
- Cuando se sustituye una estructura de aluminio trivalente a silicio tetravalente, en esta última estructura se tiene menor valencia, lo cual favorece el desbalance de carga de algunas unidades estructurales de arcilla. En la mayoría de los casos, la sustitución se compensa con adsorción de cationes.
- Si hay grupos hidroxilo dentro de la estructura se presentará un intercambio de cationes por el hidrogeno.

El proceso de intercambio catiónico es rápido, la velocidad se determina por la velocidad con que los iones se desplazan hacia los centros de adsorción, por cualquiera de los siguientes métodos:

- Difusión (gradiente de concentración).
- Migración (gradiente de potencial eléctrico).
- Convección (agitación o cambios de densidad).

En la Tabla 13 se evidencia la variabilidad de la capacidad de intercambio catiónico para algunos minerales de arcilla, siendo la montmorillonita y vermiculita los minerales con mayor intercambio de cationes. Por otra parte, la caolinita tiene el menor intercambio de cationes debido a las limitaciones de sustitución de cationes dentro de su estructura cristalográfica, sin embargo, hay estudios que reportan el incremento en el intercambio de cationes cuando la caolinita tiene cristales más finos.

Tabla 13. Valores típicos de intercambio catiónico

Mineral	Capacidad de intercambio catiónico (mEq/100 g de suelo seco)
Montmorillonita	60 – 160
Ilita	20 – 40
Caolinita	2 – 15
Halloisita	6 – 70
Atapulgita	25 – 30
Vermiculita	65 – 146

Fuente: (Mielenz & King, 1952, p. 209)

Adicional, los cationes orgánicos se atraen a la superficie de los minerales arcillosos por fuerzas electrostáticas y fuerzas de Van der Waals, las cuales desplazan los cationes inorgánicos que se encuentran en el suelo.

Cuando las arcillas interactúan con compuestos orgánicos se forman reacciones con múltiples variables que incluyen a las láminas de silicato, los cationes inorgánicos, el agua y las moléculas orgánicas. Por otra parte, la interacción del compuesto orgánico con el sólido es función del tipo de molécula orgánica (peso molecular, longitud de la cadena, grupos hidrofóbicos presentes [-C-C-C-], grupos electronegativos [-C=O, -C-O-C-, -OH], etc.) (Contreras et al., 2003).

Los mecanismos de adsorción de los compuestos orgánicos incluyen (Contreras et al., 2003):

- Intercambio iónico: este proceso implica el intercambio de los iones adsorbidos del compuesto orgánico por iones cargados similarmente. Existen dos tipos de intercambio, catiónico y aniónico. El intercambio catiónico se fundamenta en la adsorción de cationes orgánicos en los minerales arcillosos, al remplazarlos por cationes metálicos inorgánicos que saturan la carga negativa que tienen las láminas del silicato. El intercambio aniónico es la adsorción de aniones orgánicos en los sitios de carga positivos, en las superficies donde hay óxidos o en los bordes de las arcillas

donde se tienen grupos funcionales de carboxilos, fenoles o sulfatos, donde se reemplazan los aniones intercambiables monovalentes que se unen a la superficie hidroxílica, no obstante, no es frecuente que se desarrolle por la debilidad en las fuerzas electrostáticas que se desarrollan.

- Protonación de moléculas orgánicas en las superficies arcillosas: este mecanismo se presenta por las reacciones ácido-base con especies protonadas. La cantidad de base orgánica neutra que se protona es función de la fuerza de los cationes inorgánicos, la condición de base de las moléculas adsorbidas, el contenido de agua y el tipo de carga de la capa (tetraédrica u octaédrica). En este proceso los cationes orgánicos interaccionan con la carga negativa de los minerales, reemplazando los cationes inorgánicos.
- Formación ión-dipolo y coordinación: en este mecanismo los iones metálicos forman compuestos de coordinación de tipo ión-dipolo con los aniones o moléculas polares, sin implicar donar electrones. Hay casos en que el compuesto orgánico se adsorbe en el interior del silicato laminar, donde por el bajo peso de la molécula orgánica desplaza el agua adsorbida por el silicato. También se pueden adsorber las moléculas orgánicas en los planos basales y actúan como un ligante.
- Fuerzas hidrofóbicas: este mecanismo implica la agregación de las moléculas que se atraen entre sí por los grupos hidrofóbicos, lo cual genera una fuerte hidrofobicidad del agregado con la correspondiente adsorción en la superficie del sólido.

La adsorción de las moléculas orgánicas en los minerales de arcilla no solo se produce en la superficie externa, estudios con técnicas de difracción por rayos X (DXR) evidencian presencia de moléculas orgánicas en las regiones interlaminares de las arcillas 2:1, las cuales tienen un gran potencial de expansión y por tanto se asocian a una gran capacidad de intercambio catiónico. Cuando se presentan los compuestos orgánicos en los espacios interlaminares de los silicatos se denomina intercalación o solvatación, usualmente se desarrolla en minerales arcillosos 2:1 en

comparación con los minerales arcillosos 1:1, esto se justifica porque los minerales 1:1 tiene una fuerte unión interlaminar lo que dificulta la penetración de las moléculas orgánicas.

Por ejemplo, las moléculas orgánicas en la caolinita se adsorben en su superficie externa y bordes, pero en el caso de la montmorillonita se adsorben en mayor proporción en los espacios interlaminares por conformar allí la mayor parte de su superficie específica, y en menor proporción en la superficie externa y los bordes del mineral.

Por otra parte, cuando se adsorben las moléculas orgánicas en los espacios interlaminares se requiere de suficiente energía para exceder o igualar las fuerzas que mantiene unidas a las láminas; cuando se tiene presencia de molecular polares (agua) se favorece el proceso de adsorción como sería el caso de la montmorillonita, donde el agua separa las láminas del mineral, esta consideración fue realiza en estudios con benceno.

3.2. Propiedades Índice de los Suelos

El suelo está compuesto por partículas minerales junto con agua y aire, esto se representa en el diagrama de fases, en donde la fase líquida generalmente es agua y la fase de gas es aire; el agua y aire se encuentran dispersos en los espacios vacíos presentes entre las partículas. La fase solida está conformada por partículas minerales y en algunos casos materia orgánica, variando la cantidad y tamaño de las partículas.

La identificación de las fases del suelo permite formular las relaciones gravimétricas y volumétricas necesarias para resolver la gran variedad de problemas de la ingeniería geotécnica (Al-Khafaji & Andersland, 1992, p. 10), Figura 9.

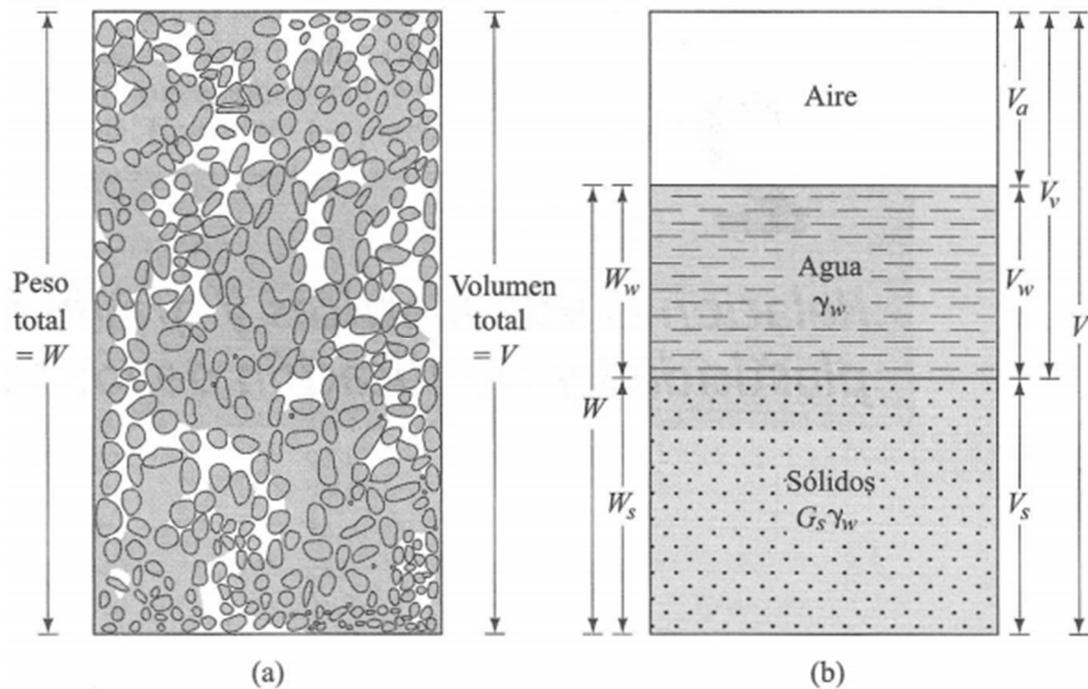


Figura 9. Diagrama de fases. (a) suelo natural; (b) fases presentes en el suelo.
Fuente: (Das & Cera, 2001, p. 18)

En la Figura 9 se ilustra un diagrama de fases del suelo en donde:

V_a , volumen del gas y V_w , volumen del agua, se agrupan en V_v , volumen de vacíos, correspondiente al volumen que no tiene material sólido, y V_s , volumen de los sólidos. Por tanto, el volumen total de una muestra se expresa como:

$$V = V_v + V_s \quad (3.1)$$

Al suponer el peso del aire despreciable se expresa el peso total de la muestra como:

$$W = W_w + W_s \quad (3.2)$$

Donde, W_w corresponde al peso de la fase líquida y W_s a la fase sólida.

3.2.1 Relaciones gravimétricas.

Las relaciones gravimétricas son relaciones referentes a los pesos, las cuales son:

- Contenido de humedad natural, ω : razón entre el peso de agua y el peso de los sólidos para un volumen dado del suelo expresado en porcentaje.

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

- Peso unitario, γ : representa el peso del suelo por volumen unitario, se determina por la gravedad específica de la fase sólida y líquida presente en la estructura del suelo, expresado en kiloNewton por metro cúbico (KN/m³).

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (3.4)$$

Si la muestra de suelo tiene una forma regular su volumen se puede calcular fácilmente con expresiones matemáticas, y se pesa su masa. Pero si la forma de la muestra de suelo es irregular, el cálculo del peso unitario se realiza por medio de la muestra de suelo parafinada.

3.2.2 Relaciones volumétricas.

Las relaciones volumétricas son relaciones referentes a los volúmenes, las cuales son:

- Relación de vacíos, e : razón entre el volumen de vacíos y el volumen de los sólidos.

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

(3.5)

- Porosidad, n : razón entre el volumen de vacíos y el volumen total, V .

$$n = \frac{V_v}{V}$$

(3.6)

- Grado de saturación, S : razón entre el volumen de agua y el volumen de vacíos expresado en porcentaje.

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

(3.7)

La relación de vacíos y la porosidad son expresiones de la fábrica del suelo y se fundamentan por la relación entre las partículas, la cual es causada a lo largo de la historia geológica o durante la construcción de un relleno y su modificación por procesos de consolidación o corte. Por ello, la fábrica en el suelo es importante caracterizarla, más aún cuando en la mayoría de los suelos se tiene presencia de minerales de arcilla que influyen en la adhesividad, cohesividad, comportamiento plástico y cambios volumétricos de acuerdo con el contenido de agua del suelo.

Mielenz & King (1952) reportan investigaciones donde se pone de manifiesto que los iones intercambiables y el tipo de mineral de arcilla influyen en las curvas de peso unitario y contenido de humedad para los suelos con montmorillonita y caolinita. Así mismo, la relación de vacíos y la porosidad de los suelos cambian con los procesos de carga y consolidación, siendo dependientes de la gradación, propiedades de expansión y contracción, cantidad y tasa de carga, entre otras. En el momento en que la carga es constante, la tasa de cambio en las propiedades de porosidad, relación de vacíos y peso unitario dependerá de la permeabilidad del suelo.

Cualquier alteración en las condiciones naturales del suelo se representará en un cambio de sus propiedades y características, lo cual es fundamental conocer en el diseño de las obras de ingeniería para asegurar que no se presenten deterioros y un periodo óptimo funcionamiento.

Por tanto, las propiedades índice permiten caracterizar, clasificar y comprender el comportamiento del suelo para el diseño de las estructuras geotécnicas, pueden ser dependientes o independientes de la estructura del suelo.

Las propiedades dependientes de la estructura del suelo son: relación de vacíos (e), porosidad (n), grado de saturación (S) y peso unitario (γ); por su parte, las propiedades independientes de la estructura del suelo son: peso unitario de los sólidos (γ_s), gravedad específica de los sólidos (G_s) y contenido de humedad natural (ω), estas se determinan por medio de ensayos de laboratorio y con sus resultados se calculan las siguientes propiedades:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \quad (3.8)$$

$$e = \frac{G_s}{\gamma_d} \times \gamma_w - 1 \quad (3.9)$$

$$S = \frac{\omega \times G_s}{e} \quad (3.10)$$

3.2.3 Gravedad específica de los sólidos.

Es la relación entre el peso unitario de los sólidos y el peso unitario del agua a una temperatura de 20°C, se expresa como:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

(3.11)

La determinación de este factor implica el uso de agua, si bien las arcillas están parcial o totalmente deshidratadas, durante la realización del ensayo adsorberán el agua y en consecuencia se verá aumentada su gravedad específica porque el volumen de los sólidos es menor, sin embargo, la variación dependerá de la clase y cantidad de minerales de arcilla presentes en el suelo ensayado (Mielenz & King, 1952, p. 217). Ahora bien, por pequeño que sea el cambio en la gravedad específica de los sólidos se generará una diferencia que puede ser significativa en los valores calculados de la relación de vacíos, grado de saturación, la porosidad y el peso unitario total, entre otras, dependiendo del tipo de suelo y los minerales de arcilla que lo constituyan.

3.2.4 Consistencia del suelo.

La consistencia de los suelos finos fue estudiada a principios del siglo XX por Albert Mauritz Atterberg de acuerdo con el contenido de humedad, así, cuando se presenta un bajo contenido de humedad el suelo tiende a comportarse como un sólido frágil, por el contrario, al presentar un contenido de humedad alto se comporta como un fluido. Por tanto, el suelo puede comportarse sólido, semi-sólido, plástico y líquido de acuerdo con el agua presente en su estructura (Das & Cera, 2001, p. 27).

Los límites de consistencia están directamente relacionados con las fuerzas de atracción y repulsión que se presentan en el suelo, las cuales son función de la carga eléctrica de las partículas y el espesor de la doble capa difusa. Por tanto, el contacto de las partículas del suelo con líquidos diferentes al agua modificará el valor de los límites de consistencia. En el caso del diésel, un hidrocarburo ligero cuyas moléculas son no polares y de baja solubilidad, se espera un descenso del límite líquido con pérdida de la plasticidad del suelo llegando a comportarse como los materiales granulares. Montoro (2011) explica que, los fluidos orgánicos al tener una

permitividad dieléctrica baja y moléculas no polares, las fuerzas de atracción resultantes entre las partículas del suelo son mayores, permitiendo la formación de estructuras floculadas entre las partículas; así mismo, al aumentar la concentración iónica del fluido orgánico se reduce el límite líquido, por el menor espesor de la doble capa difusa, esto se observa en la Figura 10.

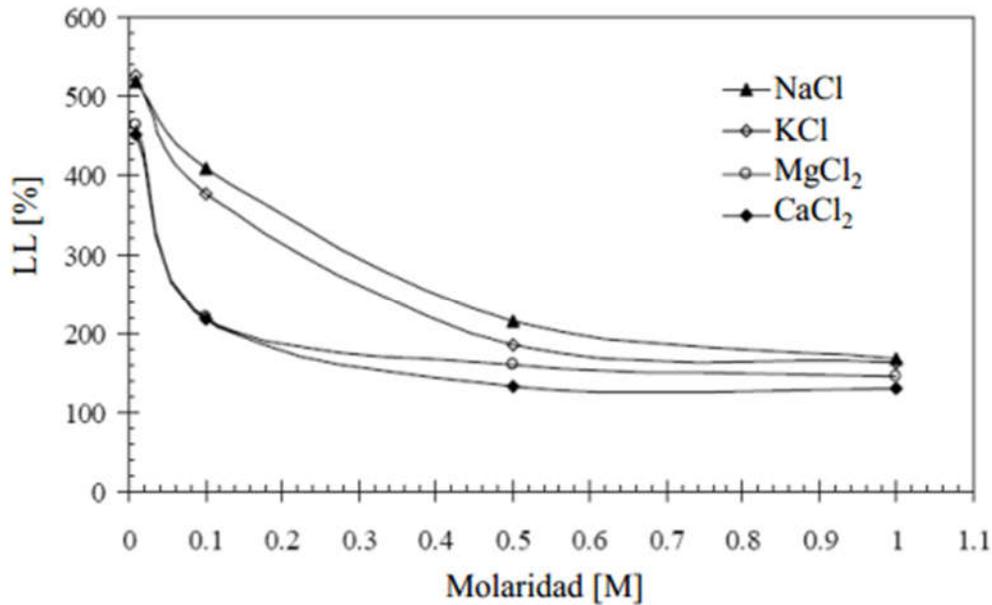


Figura 10. Efecto de la concentración iónica en el límite líquido de una bentonita cálcica. Fuente: (Montoro, 2011, p. 49)

En adición, el cambio en el comportamiento del suelo se debe a la variación en las fuerzas de atracción y repulsión, tal como se mencionó, estas fuerzas condicionan los límites de consistencia, en donde las fuerzas de atracción aumentan debido a la baja constante dieléctrica ($\epsilon \sim 2$) (Izdebska-Mucha & Trzciński, 2008, p. 11) y a las moléculas no polares, lo cual propicia la formación de estructuras floculadas.

3.2.4.1 Límite líquido.

Casagrande en 1932 definió el límite líquido como el contenido de humedad, en porcentaje, donde la resistencia cortante del suelo es de

aproximadamente 2.5 KN/m². Por tanto, al usar el dispositivo para límite líquido cada golpe corresponde a una resistencia cortante del suelo de 0.1 KN/m², de esta forma a los 25 golpes se encontrará el límite líquido del suelo (Das & Cera, 2001, p. 28).

Debido a la complejidad y tiempo en la realización de los ensayos para determinar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, algunos autores han estimado correlaciones lineales para determinar la capacidad de intercambio catiónico, CIC (mEq, 100 g), haciendo uso de los valores del límite líquido de los suelos; en un estudio realizado por Yukselen y Kaya (2006) se presentan las siguientes ecuaciones con las cuales se obtienen buenos estimativos del CIC.

$$\text{CIC} = 0.45 \text{ LL} - 5 \text{ (Farrar \& Coleman, 1967)}$$

(3. 12)

$$\text{CIC} = 1.74 \text{ LL} - 38.3 \text{ (Smith et al., 1985)}$$

(3.13)

Su estimación es importante para propósitos de ingeniería puesto que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se relaciona directamente con la capacidad de adsorción del suelo, por tanto, a medida que aumenta CIC, mayor será la capacidad de adsorción y expansión.

En la Tabla 14 se presenta una clasificación del potencial de expansión de los suelos arcillosos basado en la CIC y en la Tabla 15 según el valor del límite líquido. Y la Figura 11 ilustra la relación entre el CIC y el límite líquido con el potencial de expansión en los suelos arcillosos.

Tabla 14. Clasificación del potencial de expansión según CIC

CIC (mEq/100g)	Clasificación de expansión
< 27	Baja expansión
27 – 37	Mediana expansión
37 – 55	Alta expansión
> 55	Muy alta expansión

Fuente: (Yilmaz, 2004)

Tabla 15. Clasificación del potencial de expansión según el límite líquido

% Límite líquido	Clasificación de expansión
0 – 20	No expansiva
20 – 35	Baja expansión
35 – 50	Mediana expansión
50 – 70	Alta expansión
70 – 90	Muy alta expansión
> 90	Extremadamente expansiva

Fuente: (Yilmaz, 2004)

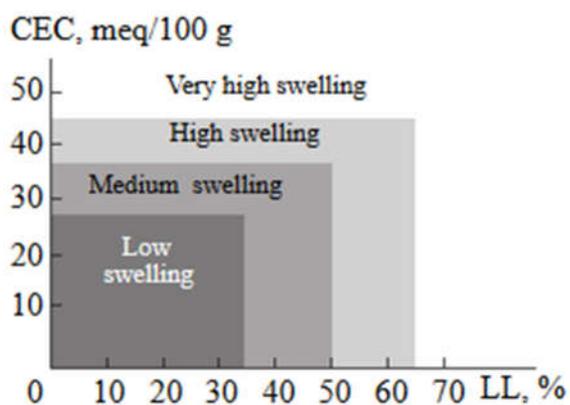


Figura 11. Potencial de expansión de los suelos arcillosos según CIC y LL.

Fuente: (Yilmaz, 2004)

3.2.4.2 Límite plástico.

Corresponde al contenido de humedad, en porcentaje, donde el suelo se deja moldear en rollos de 3.2 mm de diámetro sin desmoronarse encontrándose en estado plástico. El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, se expresa como:

$$IP = LL - LP \quad (3.14)$$

Este índice permite determinar la plasticidad del suelo, en la Tabla 16 se presenta una clasificación propuesta por Burmister para interpretar los resultados de laboratorio de esta propiedad.

Tabla 16. Clasificación de la plasticidad de los suelos según Burmister

Plasticidad	Índice de plasticidad
No plástico	0
Leve	1 – 5
Baja	5 – 10
Media	10 – 20
Alta	20 – 40
Muy alta	> 40

Fuente: (Mielenz & King, 1952)

Los límites de Atterberg son controlados por las propiedades físicas y químicas de los suelos permitiendo establecer correlaciones con las propiedades mecánicas, por ejemplo, se han establecido relaciones lineales con el ángulo de fricción interno de los suelos cohesivos, en donde para límites líquidos superiores a 35% e índice de plasticidad entre 0% y 15% se esperaría un gran ángulo de fricción si hay una buena gradación; cuando el índice de plasticidad es menor a 5, la cohesión es baja o nula, en caso

contrario, con valores altos del índice de plasticidad se espera una gran cohesión (Mielenz & King, 1952, p. 219).

3.2.4.3 Límite de contracción.

Corresponde al contenido de humedad, en porcentaje, donde no se presenta cambio de volumen de la masa de suelo seca.

El índice de liquidez (IL) representa la consistencia relativa del suelo en condición in situ y se expresa como:

$$IL = \frac{\omega \times LP}{LL - LP} \tag{3.15}$$

En la Tabla 17 se presenta un ejemplo de los valores de los límites líquido, plástico y de contracción de diferentes minerales de arcilla. Se aprecia que los suelos con presencia de minerales tipo montmorillonita tienen grandes valores del límite líquido y bajos valores del límite de contracción, por tanto, son materiales de alta plasticidad.

En el caso de minerales como la nontronita, halloisita deshidratada y clorita, presentan bajos valores del límite líquido junto a un bajo índice de plasticidad, lo cual indica que tienen tendencia a comportarse como materiales de baja plasticidad.

En síntesis, la presencia de determinados minerales de arcilla en el suelo influencia su estructura y comportamiento.

Tabla 17. Valores de los límites de Atterberg para diferentes minerales de arcilla

Mineral	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Límite de contracción (%)
Montmorillonita	100-900	50-100	8.5-15
Nontronita	37-72	19-27	
Illita	60-120	35-60	15-17
Caolinita	30-110	25-40	25-29
Haloisita hidratada	50-70	47-60	
Haloisita deshidratada	35-55	30-45	
Palygorskita	160-230	100-120	
Clorita	44-47	36-40	
Alofana	200-250	130-140	

Fuente: (Mitchell, 1976, p. 173)

3.3. Sistema de Clasificación de Suelos

Los suelos se han agrupado en diferentes grupos de acuerdo con una serie de criterios, esto para facilitar el análisis de los problemas geotécnicos y tener una descripción cualitativa de estos materiales; los criterios más utilizados son la granulometría y la plasticidad. Dentro de los sistemas de clasificación se tienen (Santamarina & Narsilio, 2008, p. 1):

- Sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS;
- Sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials);
- Y otros sistemas de clasificación.

En esta investigación se utilizó el sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS) propuesto originalmente por Casagrande en 1932 y presentado en la ASCE en 1948. En este sistema se dividen los suelos de acuerdo con su distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico.

El tamiz #200 (partículas de diámetro inferior a 75 μm) representa la división entre los materiales granulares (gravas, G y arenas, S) y finos (limos, M y arcillas, C); todas las partículas que pasan el tamiz #200 son finas, tienen fuerzas de naturaleza eléctrica, las cuales pueden ser atractivas o repulsivas de Van Der Waals (Santamarina & Narsilio, 2008, p. 3). Los suelos finos pueden tener presencia de materia orgánica, caso en el cual se identifican con el símbolo O (orgánico).

Para aplicar este sistema de clasificación se requiere conocer la distribución granulométrica, el índice de plasticidad y el límite líquido, estos dos últimos se grafican en la carta de plasticidad para diferenciar entre limos y arcillas.

3.3.1 Carta de plasticidad.

La determinación de los límites líquido y plástico del suelo permite definir la naturaleza de los suelos cohesivos. En 1932, Casagrande investigó la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido de diferentes tipos de suelo con lo cual elaboró la carta de plasticidad utilizada para diferenciar la fracción fina, Figura 12.

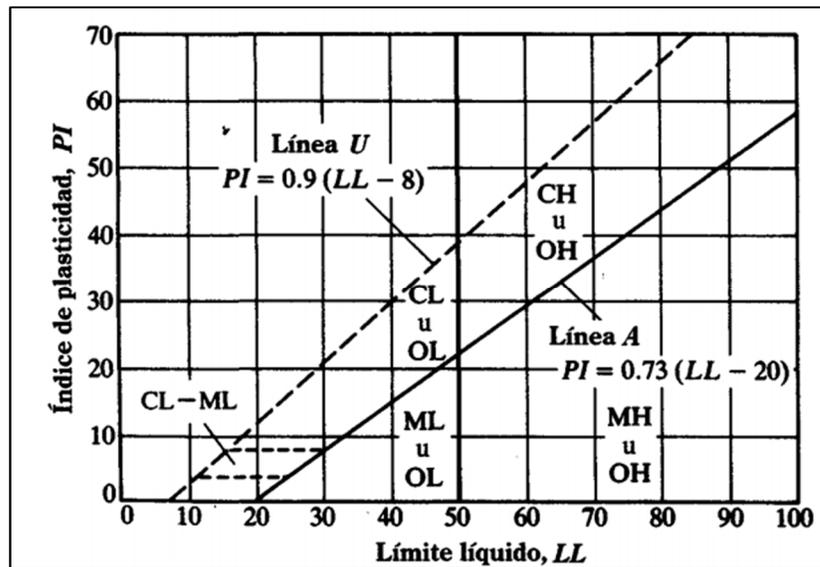


Figura 12. Carta de plasticidad. Fuente: (Das, Cera Alonso, & Bernal Carreño, 2001, p. 19)

La línea A es una línea divisoria entre las arcillas y los limos, tiene por ecuación:

$$I_p=0.73 (\omega_{LL}-20)$$

(3.16)

Las arcillas inorgánicas se encuentran por encima de la línea A y por debajo los limos inorgánicos. Cuando se tiene un límite líquido inferior a 50% se tiene baja compresibilidad (L), en caso de ser superior se tiene alta compresibilidad (H). Por tanto, se pueden tener las siguientes combinaciones de símbolos: CL, ML, CH, MH, OL y OH.

La información de esta carta es indispensable para clasificar el suelo con el sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS) y tener una descripción cualitativa del comportamiento del suelo.

En la carta de plasticidad, la zona con índice de plasticidad entre 4 y 7 a la izquierda de la línea A corresponde a una zona donde los suelos se pueden identificar como arcillas y limos.

3.4. Resistencia a la Compresión Inconfinada de los Suelos

La resistencia a la compresión inconfinada depende de la fábrica y composición del suelo junto al tamaño de las partículas, forma y gradación, distribución de los vacíos, contenido de líquidos y aire. Todos estos factores no solo controlan el valor de la resistencia sino la forma de la falla.

El tipo de mineral presente en el suelo tiene efecto en la resistencia, cuando se agregan pequeñas cantidades de montmorillonita incrementa rápidamente la resistencia, caso contrario, cuando se agrega caolinita, halloisita o ilita, esto se debe a que los granos de la montmorillonita son finos y su fábrica es dispersa favoreciendo la ganancia de resistencia (Mielenz & King, 1952, p. 228).

Para la realización del ensayo se requiere tener una muestra cilíndrica, la cual será sometida a un ensayo de compresión sin confinamiento donde la carga por unidad

de área describe la consistencia del suelo. La máxima carga por unidad de área que soporta el suelo antes de fallar durante el ensayo se denomina resistencia a la compresión inconfiada, q_u , y su resistencia al corte se define como:

$$S_u = \frac{q_u}{2} \tag{3.17}$$

La sensibilidad de las arcillas es un parámetro que caracteriza la pérdida de resistencia por remoldeo, se define como:

$$Sensitividad = \frac{Resistencia\ inalterada\ (q_{ui})}{Resistencia\ remoldeada\ (q_{ur})} \tag{3.18}$$

Para su determinación se requiere remoldear el suelo, esto implica destruir su estructura original, por ejemplo: moldear la muestra, procesos de movimientos de tierra o remplazos de material; esto conlleva la pérdida de resistencia puesto que se debilita la adhesión electroquímica entre las partículas junto con la redistribución del agua adsorbida que queda libre (Berry & Reid, 1993, p. 20). Los valores obtenidos de sensibilidad pueden ser interpretados según la Tabla 18.

Tabla 18. Criterios de interpretación de la sensibilidad de las arcillas

Condición	Sensitividad
No sensitiva	<2
Baja sensibilidad	2-4
Media sensibilidad	4-8
Alta sensibilidad	8-16
Muy sensitiva	>16

Fuente: (Al-Khafaji & Andersland, 1992, p. 347)

3.5. Hidrocarburos en el Suelo

Los factores de interacción entre el hidrocarburo y el suelo comprenden (N. Yong, Nakano, & Pusch, 2012, p. 292):

- Composición del suelo: tamaño de las partículas, propiedades físicas y químicas como capacidad de intercambio catiónico, área superficial específica, densidad, contenido de humedad natural y grado de saturación.
- Hidrocarburo: tipo, distribución y concentración en el agua intersticial, propiedades químicas y superficiales.

Sumado a que la microestructura juega un papel fundamental en la interacción del hidrocarburo con el suelo. En el caso de las partículas de minerales de arcilla, sus vacíos consisten en espacios de intercapas que pueden llegar a ser tan pequeños que no permiten el fácil movimiento del hidrocarburo por los requerimientos de energía.

El movimiento del hidrocarburo en los espacios de intercapas se define por la interacción de este con la carga que tenga la superficie de las partículas minerales, en el caso de las partículas de minerales de arcilla tienen cargas negativas.

Los derivados del petróleo tienen compuestos químicos orgánicos no polares con bajos momentos dipolares (menores que uno) y una constante dieléctrica menor a 3; la adsorción está dada por la molécula CH, es decir, la interacción del grupo metileno con grupos de atracción de electrones de la forma C=O o C=N.

En cuanto más moléculas C=N estén junto al grupo metileno más polar será la partícula, por tanto, habrá una fuerte adsorción de estos compuestos. La estructura química de los hidrocarburos no tiene unidades de atracción de electrones como C=O y C=N asociadas con las moléculas, en consecuencia las moléculas de los hidrocarburos podrían ser débilmente adsorbidas por las moléculas del suelo sin implicar una fuerte interacción iónica con las diferentes partículas del suelo (enlaces de Van Der Waals – dipolo – dipolo) (N. Yong et al., 2012, p. 298).

3.5.1 Transporte de hidrocarburos en el suelo.

La forma en la que se transportan los hidrocarburos en el suelo es un tema de amplio estudio, se ha encontrado que los hidrocarburos se introducen en el suelo y empiezan a fluir por efecto de la gravedad y las fuerzas capilares, considerando que se presenta en zonas no saturadas del suelo.

Partiendo de este principio se han desarrollado diferentes modelos que ilustran las tres (3) fases de flujo presentes en el suelo:

- Aire.
- Agua.
- Hidrocarburo.

La Figura 13 ilustra las posibles fases de flujo ante la presencia de hidrocarburos. Por encima del nivel freático se desarrollan 3 fases en el suelo y por debajo dos fases, una continua y otra discontinua. La fase continua depende de la presencia de fuerzas de conducción subterráneas que generen el movimiento del hidrocarburo; la fase discontinua se refiere a que el hidrocarburo queda como residuo y las fuerzas conductoras subterráneas no son suficientes para su movimiento.

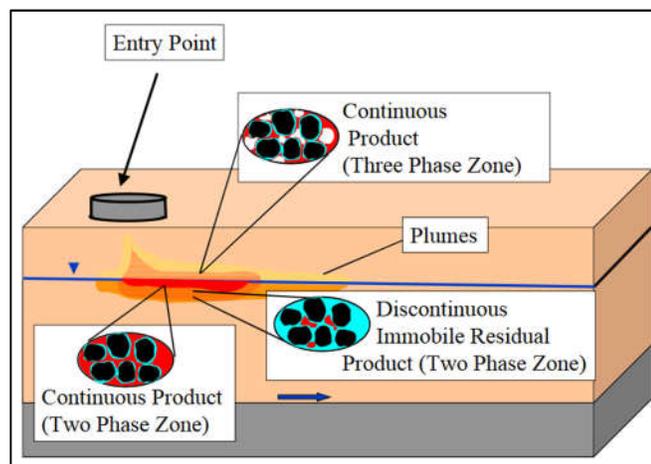


Figura 13. Concepto de transporte de hidrocarburos en el suelo. Fuente: (Sale, 2001, p. 7)

3.5.1.1 Parámetros de transporte de los hidrocarburos.

Las características del hidrocarburo y del suelo condicionan los parámetros de transporte de los hidrocarburos a través del medio poroso, sus conceptos y métodos de determinación son importantes para el planteamiento de los modelos teóricos de flujo de contaminantes en el suelo. Newell, Acree, Ross, y Huling (2015) mencionan los siguientes parámetros a considerar dentro del transporte de hidrocarburos ligeros en el suelo:

-Densidad

En el caso de los hidrocarburos ligeros como el diésel y la gasolina presentan densidades menores a 1, por lo cual flotarán sobre el agua. La temperatura es un factor influyente puesto que a mayor temperatura decrece la densidad del fluido, esto afecta directamente la movilidad del fluido a través de los vacíos o fracturas del suelo. La conductividad hidráulica de un medio poroso es una función de la densidad y la viscosidad del fluido, así, al incrementar la densidad se espera un incremento de la conductividad hidráulica.

-Viscosidad

Es una medida de la resistencia al corte del fluido, la cual depende de la temperatura. En la mayoría de los fluidos la viscosidad disminuye con el incremento de la temperatura. En la medida que la viscosidad es menor, se requiere menos energía para el flujo del fluido a través del medio poroso.

-Tensión interfacial

Los hidrocarburos ligeros y el agua son líquidos inmiscibles, cuando entran en contacto se genera una energía superficial que corresponde a la tensión interfacial producto de la resultante de las fuerzas moleculares de atracción entre los fluidos y la superficie, esta tensión se expresa en unidades de energía por unidad de área. La tensión superficial se afecta por la temperatura, cambios de pH y la presencia de compuestos gaseosos en superficie.

-Humectabilidad

Se define como la tendencia de un fluido a extenderse o adherirse a una superficie sólida en presencia de otro fluido con el cual es inmiscible. En sistemas con múltiples fases, un fluido será atraído fuertemente a la superficie sólida, lo cual se conoce como fase humectante, esta ocupará los espacios vacíos más pequeños dentro de la estructura del suelo; el fluido no humectante ocupará los espacios vacíos que se interconecten y sean de mayor tamaño.

En suelos no saturados se tendrá presencia de aire, agua e hidrocarburo, donde preferiblemente el agua será la fase humectante por sus características de interacción con los minerales de arcilla. En cambio, si solo se tiene presencia de aire e hidrocarburo, el hidrocarburo será la fase humectante que se adhiere a la superficie del mineral desplazando el aire de los vacíos de los poros.

En el caso de suelos saturados donde se tiene presencia de agua e hidrocarburo, el agua será la fase humectante y por sus características físicas desplazará al hidrocarburo de los espacios vacíos dentro de la estructura del suelo.

Este parámetro se ve afectado dependiendo del tipo de hidrocarburo, la composición de las fases en el suelo, la presencia de materia orgánica, tipo de minerales que componen la estructura del suelo y la saturación.

-Presión capilar

Corresponde a la diferencia de presión en la interface entre la fase humectante y la fase no humectante, se expresa en término de la altura de una columna de agua. Así mismo, permite determinar la atracción relativa de las moléculas de un líquido (cohesión) con otras moléculas o con la superficie sólida (adhesión). Por lo tanto, la presión capilar estima la tendencia de los espacios vacíos de atraer la fase humectante y repeler la fase no humectante.

La presión capilar aumenta en la medida que se tengan menores tamaños de los poros del suelo, menor contenido de humedad inicial e incremento de la tensión interfacial.

-Saturación y saturación residual

El transporte de los hidrocarburos ligeros está asociado con su saturación en el medio, la cual corresponde a la fracción del espacio de poros que es ocupada por un fluido. La saturación residual representa la fracción del espacio de poros que se encuentra ocupada por un fluido que no puede ser movilizado a causa de las fuerzas capilares, su magnitud depende de la distribución del tamaño de poros (textura, estructura del suelo y heterogeneidad), propiedades de humectabilidad del fluido y la fase sólida del suelo, la tensión interfacial, el gradiente hidráulico, la viscosidad y densidad del fluido, la fuerza de la gravedad y flotabilidad, y la tasa de flujo (Fernández García, Carles Brangari, & Freixas Borrell, 2004, p. 38). Los hidrocarburos ligeros pueden entrar en los poros saturados cuando sean capaces de superar levemente la presión capilar.

-Permeabilidad relativa

Se define como la relación adimensional entre la permeabilidad efectiva del medio para un fluido con saturación específica respecto a la permeabilidad del medio para un fluido con saturación de 1, la permeabilidad relativa oscila entre 0 y 1. Por ejemplo, cuando se tiene un sistema de fases agua y diésel, al aumentar el grado de saturación del agua también aumenta la permeabilidad del agua, por el contrario, la permeabilidad del diésel se reduce, como se aprecia en la Figura 14.

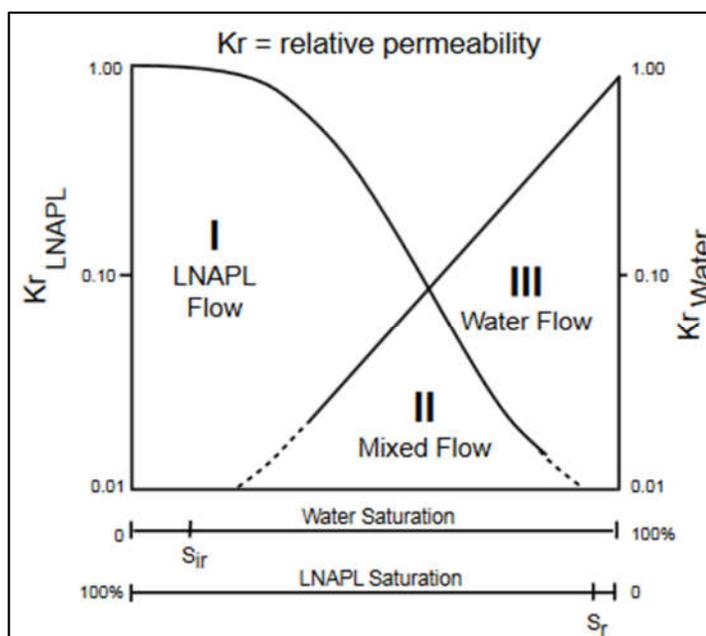


Figura 14. Curvas de permeabilidad relativa. Fuente: (Newell et al., 2015, p. 5)

Es importante precisar que la presión de la fase del aire a lo largo del estrato es constante por el bajo valor de densidad del aire, la presión del agua incrementa con la profundidad, y la presión del hidrocarburo ligero aumenta con la profundidad, pero más lentamente, debido a que el hidrocarburo ligero es menos denso que el agua.

Por ejemplo, en la Figura 14 se presenta una curva típica de permeabilidad para un medio poroso, en donde se relaciona la saturación con la permeabilidad para dos fases, agua e hidrocarburo, donde se observa que para obtener una mayor permeabilidad del hidrocarburo es necesario que la cantidad de agua presente en el suelo disminuya y por tanto, el grado de saturación.

Se aprecian 3 zonas dentro del diagrama: en la zona I, la permeabilidad del agua es baja lo que propicia el movimiento del hidrocarburo y su acumulación, pues el agua tiende a ocupar los espacios vacíos más pequeños; en la zona II, se presentan simultáneamente la fase de agua e hidrocarburo, donde el movimiento de los fluidos es pequeño puesto que la gran permeabilidad de un fluido es reducida por la saturación del otro fluido; en la zona III, el hidrocarburo es inmovilizado como un

residuo en los poros aislados y el agua si tiene movimiento dentro de la estructura del suelo (Newell et al., 2015, p. 5).

En adición, la Figura 15 muestra el comportamiento del transporte de hidrocarburos teniendo en cuenta las tres fases de flujo (agua, aire e hidrocarburo), se evidencia que la mayor cantidad de hidrocarburo en el suelo se presenta para bajos contenidos de agua y aire, es decir, los vacíos del suelo deberán ser ocupados por el hidrocarburo.

Tanto la Figura 14 como la Figura 15 ponen de manifiesto que el transporte de hidrocarburos en el suelo está condicionado con el grado de saturación del suelo, y por supuesto los vacíos que puedan ser ocupados por el hidrocarburo. El escenario ideal será un terreno con cubierta vegetal que permita el ingreso del hidrocarburo por gravedad hacia un suelo árido y con fisuras, cuyas características permiten una mayor permeabilidad del hidrocarburo.

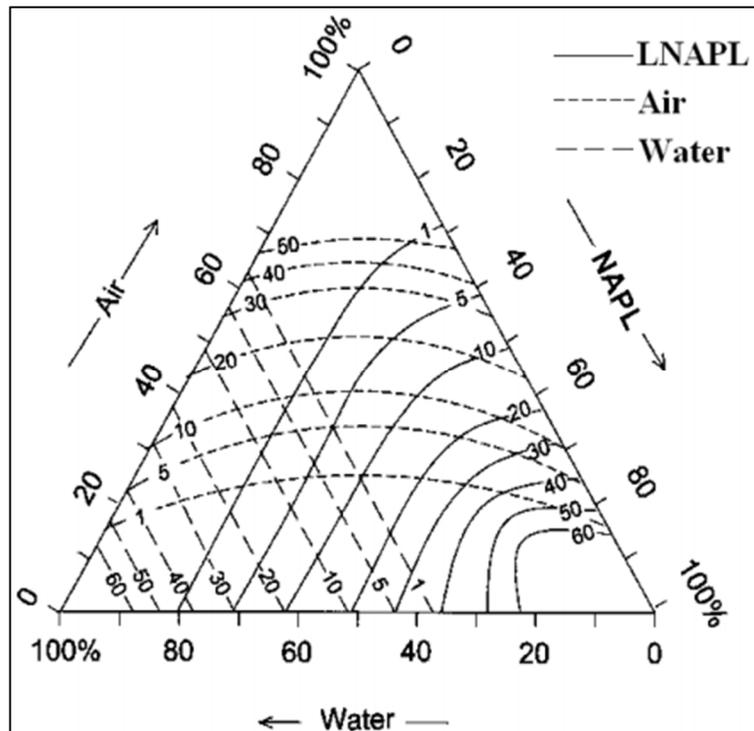


Figura 15. Comportamiento de la permeabilidad para las tres fases de flujo. Fuente: (International Symposium on Geoenvironmental Engineering, Chen, Tang, & Zhan, 2010, p. 223)

Es importante considerar que los hidrocarburos en el suelo pueden estar presentes de diferentes formas, por ejemplo, en fase gaseosa debido a la volatilización, en fase líquida debido a la disolución y en fase sólida producto de la adsorción a las partículas del suelo, Figura 16.

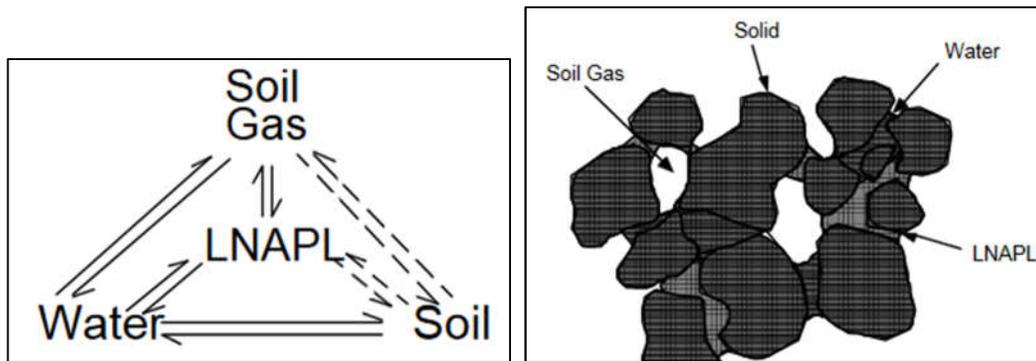


Figura 16. Fases potenciales del hidrocarburo en suelos no saturados. Fuente: (Newell et al., 2015, p. 3)

El transporte del hidrocarburo en el suelo se debe a las fases gaseosa y líquida que permiten el flujo a través de los poros y el agua subterránea (International Symposium on Geoenvironmental Engineering et al., 2010, p. 223). En la Figura 17 se observa la migración de los hidrocarburos ligeros a través de los sistemas de fracturamiento de las rocas o en estratos de arcilla que, al ser caracterizados como impermeables, actúan como medios fracturados que ofrecen sus conductos verticales y horizontales para la movilización del hidrocarburo. Por tanto, la estructura del medio poroso debe ser definida en cuanto a la distribución de los poros, su tamaño, longitud e interconectividad de los conductos de los poros; esto con el fin de identificar el flujo macroscópico del hidrocarburo dentro de la estructura del suelo y si se llega a presentar retención del hidrocarburo por parte de los poros del medio.

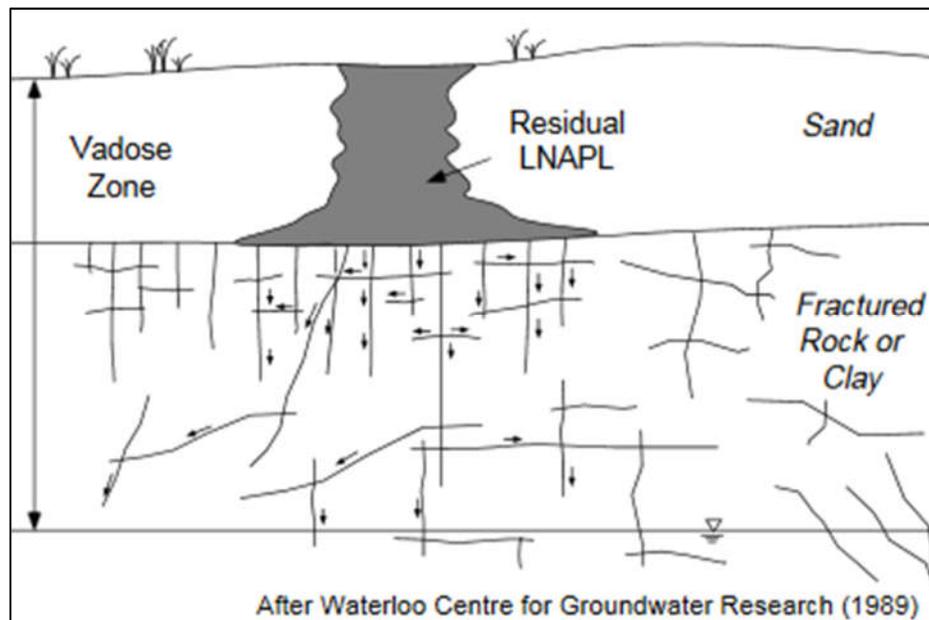


Figura 17. Migración de hidrocarburos ligeros a través de medios fracturados.
Fuente: (Newell et al., 2015, p. 8)

El flujo volumétrico del hidrocarburo en el suelo, q_0 (L^3/L^2-T), es función de las siguientes variables (Sale, 2001, p. 6):

- Permeabilidad intrínseca, k : propiedad que describe la capacidad del suelo para permitir el flujo a través de sus vacíos.
- Permeabilidad relativa, k_{r0} : corresponde a la relación adimensional de la permeabilidad con la cual se produce una saturación menor a 1 respecto a la permeabilidad del suelo saturado de 1.
- Viscosidad dinámica, μ_0 : medida de la resistencia al corte del flujo.
- Presión, P_0 : fuerza por unidad de área que genera el hidrocarburo.
- Distancia, x : medida de longitud en la dirección del flujo.
- Densidad, ρ_0 : masa por unidad del volumen del hidrocarburo.

- Constante gravitacional, g: aceleración impuesta por la gravedad, 9.81 m/s².
- Elevación, z: posición respecto al nivel de referencia en el terreno.

$$q_0 = -\frac{k k_{ro}}{\mu_0} \left(\frac{dP_0}{dx} + \rho_0 g \frac{dz}{dx} \right)$$

(3.19)

Estas variables son difíciles de cuantificar debido a la heterogeneidad del suelo y las características propias del hidrocarburo, aun así, se han elaborado diversos modelos matemáticos que permiten determinar el transporte y movilidad de los hidrocarburos en el suelo.

Capítulo IV. Fase Exploratoria

En este capítulo se expone la fase exploratoria. Esta fase incluyó la caracterización de diferentes suelos finos en condición inalterada, los cuales fueron sometidos a saturación en diésel para estudiar visualmente su comportamiento y cambios físicos apreciables; con base en los resultados parciales se modificaron las condiciones de humedad y saturación de las muestras mediante secado en horno, esto con el fin de determinar el porcentaje máximo de hidrocarburo que impregnaba en las muestras.

4.1. Características de los Materiales

Los materiales utilizados durante la fase experimental correspondieron a suelos finos (arcillas), estos materiales fueron suministrados por laboratorios de suelos en donde se buscó que las muestras para cada tipo de suelo fueran homogéneas en su grupo; una vez obtenidas se preservaron envueltas en papel vinipel y aluminio en un cuarto oscuro con temperatura controlada a 19°C hasta el momento de ser usadas en la etapa experimental.

Cada uno de los materiales se caracterizaron con propiedades tales como: contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos y límites de consistencia de forma preliminar a la impregnación con diésel, para tener un indicio de su comportamiento geotécnico.

4.2. Características del Diésel

El diésel utilizado para la investigación se adquirió en las estaciones de servicio de la ciudad de Bogotá D.C, las propiedades de este combustible cumplieron con la normatividad colombiana para su comercialización dentro del territorio nacional que corresponde a la norma ICONTEC 1438, esta norma se basa en la ASTM D-975 (Benjuma, Agudelo, & Benavidez, 2004, p. 14).

La norma ASTM D-975 presenta las especificaciones para diferentes grados de combustibles, en el caso del Diésel o ACPM (aceite combustible para motores) que se comercializa en Colombia tiene su equivalente al combustible grado 2D de esta norma. En la Tabla 19 se presentan las características principales del diésel colombiano.

Tabla 19. Especificaciones del diésel en Colombia

Propiedad	ASTM	Unidad	Especificación	
			Mínimo	Máximo
Azufre total	D 4294	g/100g		0.45
Aromáticos	D 5186	m/100mL		35
Índice de cetano	D 4737		45	
Corrosión al cobre, 3h a 50 °C	D 130			2
Color	D 1500			3
Micro-carbón residual (10% fondos)	D 4530	g/100g		0.2
Viscosidad cinemática a 40°C	D 445	mm ² /s	1.9	5
Destilación	D 86			
Temperatura 50% destilado		°C		300
Temperatura 90% destilado		°C		360
Temperatura ebullición final		°C		390
Agua y sedimento	D 1796	mL/100mL		
Punto de fluidez	D 5949	°C		4
Punto de inflamación	D 93	°C	52	
Cenizas	D 482	g/100g		0.01
Densidad a 15°C	D 1298	Kg/m ³	865.12	

Fuente: (Benjuma et al., 2004, p. 14)

4.3. Determinación del Porcentaje de Diésel para Impregnar las Muestras

De manera inicial se seleccionaron cuatro (4) tipos de suelos finos (arcillas) de diferentes características en estado natural, con el fin de observar su interacción con

el diésel, cuantificar el máximo porcentaje de diésel respecto a su peso seco que queda presente en el suelo, y de esta forma establecer los rangos de los porcentajes de diésel a utilizar dentro del estudio.

Para ello se cuantificó el contenido de humedad y saturación de las muestras. Se tomó una muestra de cada uno de los diferentes tipos de suelos y se dejaron en condición inundada con diésel en recipientes de vidrio de sello hermético, con el fin de evitar pérdidas por evaporación; se almacenaron en un lugar con humedad controlada y sin exposición al sol. Se pesaron cada uno de los recipientes de vidrio con el suelo y el diésel para monitorear mediante el peso que no se presentaran pérdidas por evaporación durante el tiempo de exposición al diésel, Figura 18.



Figura 18. Proceso de impregnación de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

El tiempo de exposición del diésel en cada uno de los suelos fue de 7 días (Echeverri et al., 2015, p. 33), de acuerdo con los resultados de las investigaciones presentadas en el capítulo I, se evidencia que este tiempo es suficiente para lograr el equilibrio entre el diésel y el suelo.

Transcurridos los 7 días se procedió a sacar las muestras de los recipientes de vidrio y realizar su pesaje, la diferencia de este peso con el de la muestra sin diésel permite

determinar cuánto hidrocarburo en gramos permanece en el suelo, y de ésta forma calcular el porcentaje de diésel con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Diésel} = \frac{\text{Peso del diésel (g)}}{\text{Peso seco del suelo (g)}} \times 100$$

(4.1)

Conocido este porcentaje de diésel máximo que retiene el suelo, se establecieron los diferentes porcentajes del combustible que se aplicaron en las muestras durante el desarrollo de la fase experimental y que se presentan en el capítulo V.

De acuerdo con los resultados experimentales a los 7 días de tener las muestras en condición inundada de diésel, se observó que las muestras presentaban adsorción del diésel, es decir, se presenta adherencia del diésel en los granos del suelo que conforman el medio poroso por retención química, esto se debe a las fuerzas de Van Der Waals y a los minerales arcillosos presentes en las muestras, los cuales tienen en su superficie cargas eléctricas negativas libres, donde el diésel al estar conformado por moléculas no polares que tienen baja solubilidad, serán adsorbidas por las partículas del suelo por la incompatibilidad del hidrocarburo con las moléculas de H₂O; este proceso representa el principal mecanismo de retención de contaminantes en los suelos (Sánchez San Román, 2012).

Al realizar un corte en las muestras se corroboró que no había absorción pues su estructura se mantuvo intacta, esto se ratifica en la Tabla 20, que resume los principales datos de laboratorio del proceso de inundación y monitoreo de las muestras en diésel de forma preliminar.

Las muestras A y D se encontraban saturadas por lo cual el hidrocarburo no podría infiltrarse, sin embargo, en su superficie presentó adsorción, por otra parte, las muestras B y C que no estaban saturadas contaban con los vacíos necesarios para que infiltrara un bajo porcentaje de diésel, sin embargo, esto no ocurrió, lo cual evidencia la dificultad del diésel para transportarse en los suelos arcillosos donde se requeriría de condiciones particulares como fisuras o vencer las fuerzas capilares. En resumen, el porcentaje de diésel expresado como porcentaje del peso

seco de las muestras varió de 0.42% a 0.71%, lo cual representa el diésel adsorbido por las partículas de suelo en su parte externa.

Tabla 20. Resultados de impregnación de diésel a las muestras en condición de natural

Muestra		A Arcilla	B Arcilla	C Arcilla	D Arcilla con MO
Peso frasco + tapa	g	365.16	365.21	365.03	366.63
Peso frasco + tapa + muestra	g	442.66	467.57	458.79	433.92
Peso frasco + tapa + diésel + muestra	g	543.29	563.4	558.64	518.48
Peso muestra	g	77.5	102.36	93.76	67.29
Contenido de humedad natural	%	115	45.8	54.9	95.9
Saturación	%	100	79.9	84.5	99.2
Peso suelo seco	g	36.05	70.21	60.53	34.35
Diésel adicionado	g	100.63	95.83	99.85	84.56
Peso muestra a los 7 días	g	77.65	102.86	94.05	67.46
Diésel en el suelo a los 7 días	g	0.15	0.5	0.29	0.17
% diésel en el suelo	%	0.42	0.71	0.48	0.49

MO: Contenido de materia orgánica

Fuente: Elaboración de la autora.

En la muestra A, la cual tuvo un 0.42% de diésel representado como porcentaje de su peso seco, se observó una fina película del combustible en su superficie junto con la aparición de una colonia de microorganismos, estos se observan en la Figura 19, los cuales no fueron identificados puesto que no se encuentra dentro del alcance de la investigación.

Tales microorganismos se desarrollaron producto de la interacción del combustible con los minerales presentes en la muestra, sumado a que las partículas de este material tienen una gran superficie específica que promueve la adhesión de los microorganismos en su superficie e incluso su agrupación.

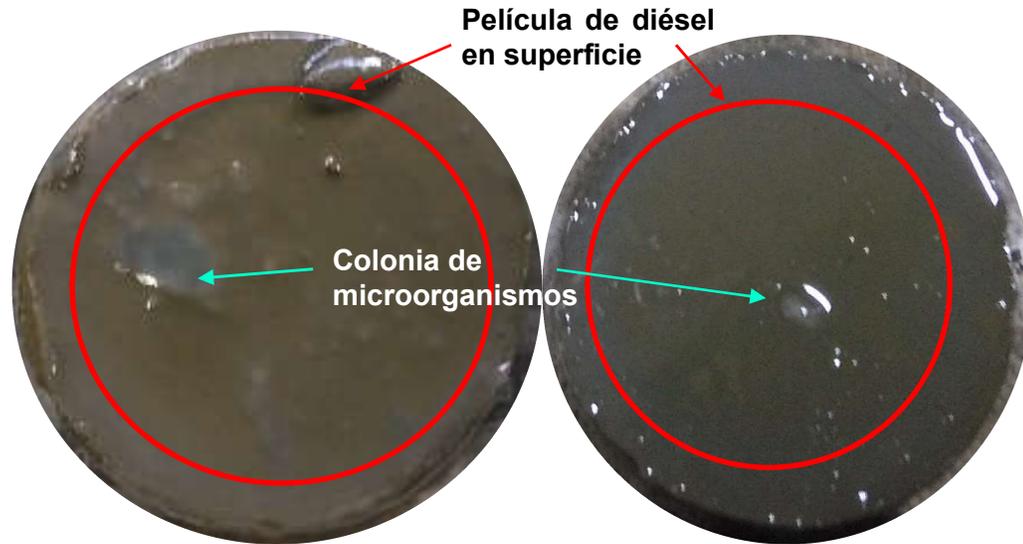


Figura 19. Muestra A después de 7 días sumergida en diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

El suelo puede contener innumerables organismos microbianos que se desarrollan de acuerdo con las características de pH y minerales de arcilla presentes (Rosenzweig & Stotzky, 1979), por tanto, este tema puede ser de interés en futuras investigaciones relacionadas con la influencia del diésel u otro hidrocarburo en el crecimiento de diferentes colonias microbianas (hongos, bacterias, etc.) en el suelo y cómo afectaría su fábrica, estructura y comportamiento.

La interacción entre los microorganismos y los minerales de arcilla puede resultar en cambios en las propiedades y comportamiento de dichos minerales, por ejemplo, se ha encontrado que las bacterias aceleran la transformación de los minerales; en las esmectitas el Fe (III) se redujo a Fe (II) producto del crecimiento de las bacterias cambiando la estructura de la arcilla; el mayor efecto en la fábrica de las arcillas, principalmente en caolinita y montmorillonita, es la adhesión de las partículas de arcilla a las bacterias formando agregados arcilla-bacterias fomentando la floculación, donde se puede presentar secreción de polisacáridos que penetran alrededor de los poros de las arcillas, lo cual incrementa la retención de agua modificando las características de contracción y expansión del suelo; se puede presentar disolución de los minerales de arcilla, esto está correlacionado con la variación del pH producto de la interacción de las bacterias con el suelo.

Por ejemplo, Zhu et al. (2011) reportaron la disolución de la montmorillonita en bentonita por la bacteria gram-negativa *Bacillus mucilaginosus*; se ha encontrado reducción del área de la superficie específica de los minerales de arcilla; incremento y disminución de la carga negativa en las capas de los minerales de arcilla producto de la reducción del Fe (III) a Fe (II) (Muller, 2015).

Esto demuestra la variabilidad en el comportamiento de los minerales de arcilla presentes en el suelo producto de la interacción con microorganismos, este es un campo de investigación muy abierto que implica la interacción con diversas disciplinas y se deja planteado para futuros investigadores.

En las muestras B, C y D se observó la adsorción del diésel en una fina película (Figura 20) cuyos porcentajes de diésel fueron 0.71%, 0.48% y 0.49% respectivamente.

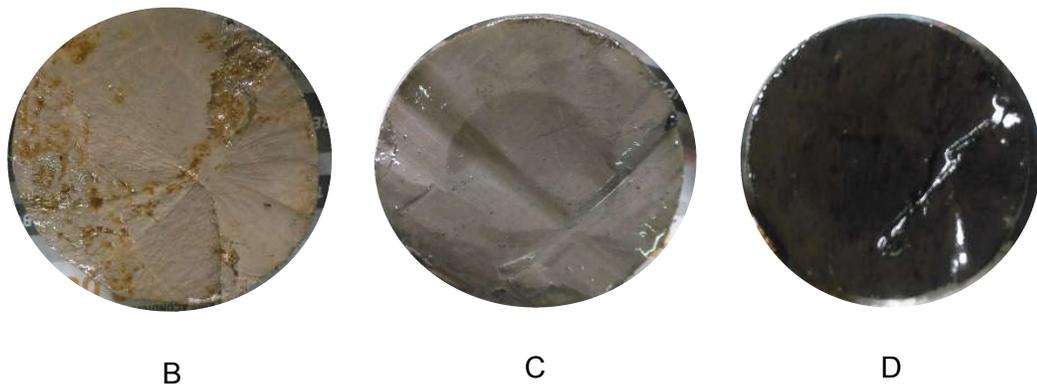


Figura 20. Muestra B, C y D después de 7 días sumergidas en diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

En el caso de la muestra D, su contenido de materia orgánica era de 26.4%, Tabla 21, aun así, el hidrocarburo no penetra en su estructura ni generó la formación de alguna comunidad de microorganismos, tal como en el caso de la muestra A.

Tabla 21. Ensayo de ignición de la muestra D, según la norma INV 121 E – 13

A: masa crisol + suelo seco antes de la ignición	52.59	g
B: masa crisol + suelo seco después de la ignición	40.61	g
C: masa crisol	7.17	g
% materia orgánica	26.4	%

Fuente: Elaboración de la autora.

Estos resultados evidenciaron la dificultad en la impregnación del diésel en las muestras a lo largo de toda su estructura, se planteó la hipótesis de que las muestras se encontraban con un valor de saturación elevado que no permitía el ingreso del diésel. Para corroborar dicha hipótesis se sometieron las muestras a un proceso de secado con el fin de disminuir los espacios vacíos ocupados por el agua y evaluar cómo se comportaba el suelo bajo esta nueva condición.

Se procedió a realizar un proceso de secado a 110°C para las muestras A, B y C, y para la muestra D a 60°C por el alto contenido de materia orgánica, esto se llevó a cabo durante un periodo de 2 horas para disminuir la saturación inicial en las muestras y liberar el agua de los espacios vacíos verificando si el diésel infiltraba en el periodo de 7 días. Los resultados de este proceso se presentan en la Tabla 22.

Se observa que en las muestras de arcilla A, C y D el diésel expresado como porcentaje del peso seco de la muestra varía de 0.65% a 2.21% transcurridos 7 días de exposición al combustible; en el caso de la muestra de arcilla B, el porcentaje de diésel alcanzado es de 6.18% debido a su bajo contenido de agua y que la muestra tenía una estructura con agrietamientos lo cual facilitaba la adsorción del diésel.

Es importante mencionar que aun disminuyendo el contenido de agua del suelo los porcentajes de diésel son bajos, corresponden a la adsorción del combustible por las partículas del suelo. Al hacer un corte a las muestras se ratifica que no se presenta absorción del combustible a lo largo de la estructura del suelo, Figura 21.



Figura 21. Corte longitudinal a la muestra C después de sumergirse en diésel 7 días.
Fuente: Elaboración de la autora.

De acuerdo con estos resultados se ratificó la dificultad para lograr impregnar la totalidad de la estructura del suelo con diésel, por ello se decidió evaluar estas muestras transcurrida una semana adicional bajo la hipótesis de que podrían requerir más de 7 días para que el combustible efectivamente penetre en la estructura del suelo.

Pasada esta semana adicional se encontró que las muestras A y C no presentaban cambio significativo, pero la muestra D caracterizada por ser una arcilla de alto contenido orgánico si presentó un aumento considerable del diésel respecto al valor tomado a los 7 días, pasó de 0.65% a 1.51%, aclarando que este porcentaje corresponde al fenómeno de adsorción. La muestra B por su parte, pasó de 6.18% a 6.84%, un aumento poco significativo.

Tabla 22. Resultados de impregnación de diésel a las muestras secadas por 2 horas

		A Arcilla	B Arcilla	C Arcilla	D Arcilla con MO
Peso de la muestra antes de secar	g	49.35	74.3	62.22	33.01
Peso de la muestra después de secar	g	39.31	64.28	53	27.07
Pérdida de agua por secado	g	10.04	10.02	9.22	5.94
Contenido de humedad natural después del secado	%	71.96	11.66	18.27	47.29
Saturación	%	62.6	20.3	28.1	48.9
Peso inicial antes del diésel	g	18.69	28.89	30.29	13.69
Peso inicial seco antes del diésel	g	10.87	25.87	25.61	9.29
Peso final con diésel (7 días)	g	18.93	30.49	30.5	13.75
Peso final con diésel (15 días)	g	18.93	30.66	30.54	13.83
Diésel en el suelo a los 7 días	g	0.24	1.6	0.21	0.06
Diésel en el suelo a los 15 días	g	0.24	1.77	0.25	0.14
% diésel en el suelo (7 días)	%	2.21	6.18	0.82	0.65
% diésel en el suelo (15 días)	%	2.21	6.84	0.98	1.51

MO: Contenido de materia orgánica

Fuente: Elaboración de la autora.

Por lo tanto, se concluye que la impregnación del diésel en los suelos finos es compleja debido a la débil interacción química entre los minerales de arcilla y la estructura molecular del diésel, así mismo por las características viscosas de este combustible que dificultan su transporte por las zonas intercapa de la estructura de este tipo de suelos.

Partiendo de este enunciado, tan solo se presenta la adsorción de diésel en las partículas de suelo que se encuentren expuestas, es decir, en las pruebas realizadas en laboratorio se evidenció que el diésel solo se retenía en la superficie de las muestras. Para que se presentará la infiltración del diésel a lo largo de la estructura de los suelos finos se requiere que el suelo se encuentre seco, con un bajo contenido de agua que permita liberar los vacíos para que sean ocupados por el combustible, o con agrietamientos o fisuras a lo largo de su estructura por donde pueda fluir fácilmente el hidrocarburo, en tal condición se tendría transporte de contaminantes en el suelo.

La definición de los porcentajes de diésel en las muestras se realizó teniendo como parámetro de referencia los resultados de las investigaciones recopiladas de los últimos 5 años que se presentaron en el capítulo I, donde se reporta que por debajo del 3% de hidrocarburo como peso seco de la muestra no se presentan cambios significativos; sin embargo, para el objeto de la presente tesis se utilizaran como porcentajes de diésel 0%, 1%, 3% y 6%.

El 1% se eligió porque la mayoría de las muestras a los 7 días tenían valores por debajo o cercanos al 1%, donde fue interesante evaluar qué cambios se pueden presentar en el suelo con este porcentaje, que puede ser cercano a muchos casos reales. El 3% se tomó como parámetro de referencia de acuerdo con las conclusiones de las investigaciones relacionadas en este tema (Huang & Lu, 2014), que indican que por debajo de este valor no hay cambios significativos. El 6% se eligió de acuerdo con las pruebas experimentales que se desarrollaron en los 4 tipos de suelos finos estudiados en el laboratorio, donde el máximo porcentaje a los 7 días obtenido fue de 6.18%.

Capítulo V. Metodología

En este capítulo se presenta el diseño de la investigación a partir de los resultados de la fase exploratoria, donde se precisan las variables dependientes e independientes junto con las consideraciones que se realizaron para garantizar la validación interna de la experimentación. La metodología de la investigación se fundamentó en la revisión de la literatura, empleando como hidrocarburo el diésel. A lo largo del capítulo se presenta la metodología llevada a cabo en el laboratorio para simular la presencia del diésel en los suelos finos (arcillas) objeto de estudio y las normas de referencia para los ensayos de laboratorio realizados.

5.1. Diseño de la Investigación

El diseño se refiere al plan de trabajo con el cual se obtendrá la información deseada, es decir, se expone la manera en la cual se impregnó el diésel a los suelos finos, su tiempo de exposición y las consideraciones respectivas para la realización de los ensayos de laboratorio con el fin de dar respuesta a la pregunta de investigación: ¿qué sucede en las propiedades geotécnicas y composición mineralógica de los suelos finos cuando hay presencia de diésel?

Partiendo de ello, el diseño de la investigación se fundamentó en la revisión sistemática de la literatura, relacionada con el estudio del efecto de los hidrocarburos en las propiedades geotécnicas de los suelos finos a partir de experimentación, de acuerdo con los resultados de la búsqueda en las bases de Elsevier, Google Scholar, Springer, CrossRef, Scielo, GeoScienceWorld, Clays and Minerals, entre otras.

Con experimento se hace alusión a realizar una acción, en este caso, impregnar al suelo de diésel, y después observar las consecuencias, es decir los cambios en las propiedades geotécnicas del suelo y su mineralogía.

La esencia de la experimentación fue manipular intencionalmente algunas variables independientes, de tal forma que se logró la presencia del diésel dentro de la estructura de diferentes tipos de suelos finos (arcillas) a diferentes contenidos de humedad, simulando lo que ocurriría en la práctica al presentarse un derrame por diésel y analizar sus efectos.

Las unidades experimentales correspondieron a las muestras de suelos finos (arcillas). En el experimento las variables independientes fueron:

- El porcentaje de diésel, corresponde al tratamiento que recibieron las unidades experimentales, con cuatro niveles de manipulación que son: sin diésel, 1% de diésel, 3% de diésel y 6% de diésel.
- La temperatura de realización de los ensayos, con dos niveles, 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C. La temperatura de 110 ± 5 °C simula la realización de los ensayos cuando no se conoce que el suelo se encuentra con presencia de diésel, en caso contrario se utiliza una temperatura de 50 ± 5 °C

Las variables dependientes son aquellas que miden el efecto de la manipulación de la variable independiente, en este caso corresponden a:

- Gravedad específica de los sólidos.
- Límite líquido, plástico y de contracción.
- Índice de plasticidad.
- Resistencia a la compresión inconfiada.
- Resistencia al corte.
- Contenido de humedad.
- Relaciones de fase: relación de vacíos, porosidad, saturación.
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Composición mineralógica.

La validación interna del experimento, no es más que el control llevado a cabo para asegurar que las variables ajenas al diseño no influyan en las variables dependientes. De acuerdo con Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2006), el control de un experimento se logra partiendo de la validez interna al utilizar más de dos grupos de comparación que son equivalentes entre sí, menos en la manipulación de las variables independientes.

En el caso de la investigación, este criterio se cumplió ya que se contó con cuatro grupos de comparación equiparables entre sí para cada tipo de suelo fino (arcilla), donde se varió el tratamiento, es decir, el porcentaje de diésel a impregnar en el suelo; con ello las diferencias que se produjeron entre los grupos o unidades experimentales se atribuyen al efecto de la manipulación de la variable independiente, en este caso el porcentaje de diésel en las muestras, y no a otros factores que son fuente de las invalidaciones internas. A continuación, se listan las fuentes de validación interna que se controlaron dentro de la experimentación:

- a. Preservar las muestras con y sin diésel en bolsas herméticas y condiciones controladas en cuarto oscuro, evitando la pérdida del diésel por evaporación y logrando que todas las unidades experimentales cuenten con las mismas condiciones ambientales.
- b. Usar hornos de temperatura controlada para asegurar las tolerancias de los ensayos.
- c. Llevar a cabo todos los ensayos en todas las unidades experimentales con rigurosidad y minuciosidad, asegurando resultados confiables y veraces, así mismo, todas las muestras ensayadas con o sin diésel, experimentaron los mismos eventos durante la ejecución de las pruebas de laboratorio.
- d. Ensayar simultáneamente todas las muestras cada vez que se realizó un tipo de ensayo, con esto se mitigó la incertidumbre de que unas muestras tuvieran, más o menos, tiempo de exposición al diésel.

- e. Agrupar para cada tipo de suelo las muestras que fueran homogéneas entre sí, de tal forma que al comparar los resultados de las muestras ensayadas fueran equiparables.

Es importante precisar que las muestras usadas en la investigación son aleatorias porque proceden de diferentes fuentes y sus datos de origen son desconocidos. La selección de las unidades experimentales se realizó partiendo del hecho de contar con muestras organizadas por sondeo, donde se escogieron muestras homogéneas entre sí, pero donde los tipos de suelos finos (arcillas) fueran heterogéneos entre sí.

La metodología de investigación se fundamentó en seguir los procedimientos experimentales de las referencias de la literatura, relacionados con el estudio de los suelos finos (arcillas) con presencia de diésel. Se estudiaron los trabajos realizados por Liu et al. (2015), Tong et al. (2012), Zárate (2014), Bian et al. (2016) y Solly et al. (2014); llegando a la conclusión que para la preparación de las muestras según la revisión de la literatura de debía seguir el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar el suelo para el ensayo, el cual se elige aleatoriamente de acuerdo con la fuente de obtención.
2. Secar al aire el suelo para evitar que se presente alteración de su composición química.
3. Definir un contenido de humedad para las muestras, adicionar el agua equivalente, mezclar y permitir el equilibrio de la humedad.
4. Dividir el suelo en tantas partes como porcentajes de hidrocarburo se vayan a emplear en la investigación.
5. Determinar para cada parte de suelo la cantidad de hidrocarburo que se adicionará, la cual se expresará como porcentaje del peso seco del suelo.
6. Almacenar cada parte de suelo con diésel en bolsas herméticas y bajo condiciones ambientales controladas durante una semana, tiempo en el cual se han mezclado los compuestos del diésel y el suelo, llegando al equilibrio.
7. Proceder a realizar los ensayos de laboratorio de acuerdo con la normatividad.

5.2. Preparación de las Muestras

De acuerdo con la revisión de la literatura y los resultados de la fase exploratoria, la impregnación del diésel en los suelos finos (arcillas) requiere seguir el procedimiento indicado en el numeral 5.1. Con el fin de lograr que la totalidad de la muestra interactúe con este fluido orgánico, inicialmente las muestras fueron secadas al aire (temperatura menor a 40°C), asegurando que no se presentó alteración química o calcinación de alguno de sus componentes originales por ser sometido a temperaturas elevadas.

Posteriormente al secado, se realizó el proceso de triturar las muestras con un molino, asegurando la fracción fina como se observa en la Figura 22.



Figura 22. Preparación de muestras para trituración. Fuente: Elaboración de la autora.

Se estableció como parámetro de control el contenido de humedad, dicho valor fue variable en el intervalo de 9% a 43% entre los diferentes tipos de suelos. Esto se realizó con el fin de obtener las mejores características de manejabilidad para cada uno de los tipos de suelos dentro del proceso de impregnación del diésel, seguidamente se calculó la cantidad de agua que representaba respecto al peso seco de las muestras, se mezcló el suelo con el agua hasta obtener un material uniforme y homogéneo, Figura 23.



Figura 23. Muestra con adición de agua y homogenizada. Fuente: Elaboración de la autora.

De acuerdo con los porcentajes de diésel definidos con los resultados de la fase exploratoria, se calculó la masa de diésel añadida a cada unidad experimental. Esta cantidad se determinó como el porcentaje de diésel multiplicado por el peso seco de la muestra. Posteriormente, se mezcló manualmente el suelo con el diésel hasta obtener un material homogéneo y uniforme; este material fue puesto en bolsas herméticas para evitar pérdidas por evaporación, y puestas en un cuarto oscuro con temperatura controlada de 19°C durante un periodo de 7 días para lograr el equilibrio entre el diésel y el suelo, Figura 24, asegurando que se tuvieran las mismas condiciones ambientales entre las unidades experimentales.

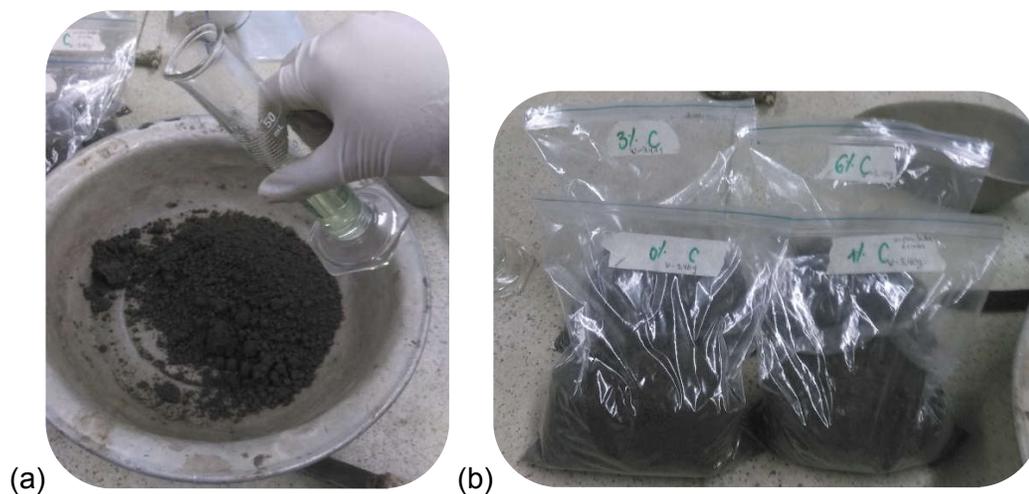


Figura 24. (a) Proceso de adición de diésel (b) Conservación de muestras para cada porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

5.3. Ensayos de Laboratorio

Los ensayos de laboratorio realizados fueron aquellos que permitieron determinar las propiedades índice, clasificación del suelo, resistencia y composición mineralógica, todas estas características son importantes para conocer el comportamiento del suelo. Estas pruebas de laboratorio fueron desarrolladas 7 días posteriores a la preparación de las muestras, manteniendo su monitoreo y adecuada preservación para evitar su alteración por factores externos, de esta forma se garantizó la validación interna en el desarrollo de la experimentación.

Así, los ensayos realizados fueron: contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, límites de Atterberg, resistencia a la compresión inconfiada y ensayo de difracción por RX en muestra total (método del polvo). Los resultados de estos ensayos y su correspondiente discusión se presentan en el capítulo VI.

5.3.1 Contenido de humedad.

Corresponde a una de las propiedades índice de amplio uso para realizar correlaciones y predecir el comportamiento del suelo, se usó la norma I.N.V.E-122-13 (INVIAS, 2013a). En dicha norma se especifica que la muestra de suelo húmedo se seca al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante, su cálculo es la relación entre la masa húmeda y la masa seca, esto asumiendo que no se conoce que el suelo tenga hidrocarburo.

Ahora, si se conoce de la presencia de hidrocarburo en el suelo, se hizo uso de la adaptación de la norma I.N.V.E-122-13 para suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A – Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013c), donde se exige una temperatura al horno de 50 ± 5 °C para la realización del ensayo y un periodo de tiempo de 35 a 40 horas para alcanzar masa constante en el suelo.

Las muestras para la realización de este ensayo se tomaron durante la realización del ensayo de compresión inconfiada, de tal forma que se tuvieran las variables necesarias para la elaboración de los diagramas de fase.

Cabe resaltar lo encontrado por Khomehchiyan, Hossein Charkhabi y Tajik (2007), el contenido de humedad determinado con la ecuación 3.3, que es la misma usada en las normas de referencia para la realización de este ensayo, no es correcta por la complejidad de la composición de las muestras.

Durante el proceso de secado en horno se presenta la evaporación del hidrocarburo y algunos de sus compuestos quedan remanentes en estado sólido bajo condiciones de temperatura controlada. Estas variables son función de la distribución en el tamaño de las partículas, conductividad térmica, adhesión y cohesión presentes en el suelo.

Estos autores reportan el incremento en la evaporación del hidrocarburo con la disminución en el tamaño de las partículas, pero disminuye la evaporación con el incremento en el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo. Es importante precisar que la transferencia de calor en el suelo se da a través de sus partículas debido a la conductividad térmica, por tanto, entre más denso el suelo mejor será su conductividad térmica y esto implica una transferencia más rápida de calor. Esta es la causa de los cambios en la evaporación de los hidrocarburos presentes en el suelo y cuyo efecto influye en la cuantificación del contenido de humedad natural.

En el caso de los suelos arcillosos su transferencia de calor es más lenta que en los suelos arenosos. El hidrocarburo absorbe más calor en los suelos arcillosos y su evaporación es mayor. Este fenómeno se relaciona también con la superficie específica de las partículas. En conclusión, la conductividad térmica tiende a aumentar con el incremento en el porcentaje de hidrocarburo presente en las muestras, donde la evaporación disminuye con el incremento en el porcentaje de hidrocarburo. Khomehchiyan et al. (2007) en su investigación presentan una ecuación (5.1) para determinar el contenido de humedad natural del suelo cuando hay presencia de hidrocarburos, para tener en cuenta la evaporación del hidrocarburo y la parte remanente que queda en estado sólido, esta expresión

podría ser investigada en una tesis futura y evaluar la pertinencia de incluir estos conceptos dentro de la normatividad colombiana.

$$\omega(\%) = (1 + m n) \frac{m_t}{m_s} - (1 + n)$$

(5.1)

Donde,

m: contenido de hidrocarburo residual después del secado

n: contenido de hidrocarburo antes del secado

m_t : masa húmeda del suelo con hidrocarburo

m_s : masa seca del suelo con hidrocarburo

5.3.2 Gravedad específica de los sólidos.

La gravedad específica se determinó haciendo uso de la norma I.N.V.E-128-13, determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral (INVIAS, 2013e), empleando un picnómetro de 500 mL con agua destilada y en donde la determinación de la masa de las partículas sólidas se realizó a una temperatura de 110 ± 5 °C, considerando que no se conoce que el suelo está con hidrocarburo.

En el caso del suelo con presencia de diésel, se trabajó a una temperatura de 60 °C para tener en cuenta el efecto del contenido orgánico que genera el diésel en la muestra de suelo, siguiendo el procedimiento de la norma I.N.V.E-128-07 (INVIAS, 2007) donde se tiene la anotación para suelos con contenido orgánico.

5.3.3 Límites de Atterberg.

Se usaron las normas I.N.V.E-125-13, determinación del límite líquido de los suelos (INVIAS, 2013b); I.N.V.E-126-13, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (INVIAS, 2013c); I.N.V.E-127-13, determinación de los factores de contracción de los suelos (INVIAS, 2013d). Estas normas no tienen en cuenta la presencia de contenido orgánico en el suelo, por tanto, partiendo del supuesto que se desconoce que las muestras se encuentran con presencia de diésel, se realizó el proceso de secado al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante.

Ahora bien, si se conoce de la presencia de hidrocarburo en el suelo, se hizo uso de la adaptación de estas normas para suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A – Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013b, 2013d), la norma exige una temperatura al horno de 50 ± 5 °C por un periodo de tiempo de 35 a 40 horas para alcanzar masa constante.

La importancia de este ensayo se encuentra en que la impregnación del diésel en el suelo puede generar cambios en su contenido de humedad, modificando los cambios de estado, y por tanto alterar su consistencia. A través de la consistencia del suelo se establece el comportamiento frente a cargas de trabajo, asentamientos y expansiones. Por otra parte, este ensayo es requisito para aplicar el sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS). Adicional, con el límite líquido mediante correlaciones es posible estimar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos ensayados y su relación con la presencia de diésel.

5.3.4 Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

El suelo se clasificó según la norma I.N.V.E-181-13, sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (INVIAS, 2013g) que desarrolla el sistema expuesto por Casagrande, básicamente divide el suelo en tres tipos:

gruesos, finos y orgánicos. Para la presente investigación en suelos finos se tienen tres grupos de clasificación: arcillas (C), limos (M) y limos orgánicos o arcillas orgánicas (O) seguido de la compresibilidad relativa, si es alta (H) o baja (L), para lo cual se requiere conocer del límite líquido e índice de plasticidad. La clasificación del suelo sin contaminante permite establecer una medida de referencia para evaluar si hay transformación en el suelo con diésel (Akinwumi et al., 2014, p. 6) y por tanto la variación del uso de estos suelos para propósitos de ingeniería.

5.3.5 Difracción por rayos X en muestra total.

El objeto de realizar este ensayo es conocer la composición mineralógica del suelo, es decir, identificar si se presentan cambios en los minerales presentes en el suelo con diésel y de qué manera influye en el cambio de las propiedades geotécnicas. El ensayo se realizó en el laboratorio nacional de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en muestra total por el método del polvo. El equipo utilizado correspondió al difractómetro de rayos X, marca PANalytical, serie DY1215, Figura 25. La identificación de las diferentes especies mineralógicas se determinó de acuerdo con los picos de difracción característicos de cada mineral, los cuales se leyeron del difractograma, y su cantidad se expresa en términos semicuantitativos.



Figura 25. Difractómetro de rayos X, gama Empeyrean, marca PANalytical. Fuente: («PANalytical - Empeyrean», 2016)

5.3.6 Ensayo de compresión inconfiada.

El objeto de realizar este ensayo es determinar la variación en la resistencia a la compresión de suelos de tipo cohesivo sin y con diésel, se usó la norma I.N.V.E-152-13, compresión inconfiada en muestras de suelo (INVIAS, 2013f) para los suelos sin diésel. En el caso de los suelos con hidrocarburo se hizo uso de la adaptación del ensayo de compresión inconfiada en muestras de suelos afectados por derrames de hidrocarburo, proyecto desarrollado por la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Colciencias y Ecopetrol S.A – Instituto Colombiano del Petróleo (Serrano Guzmán & Torrado Gómez, 2013a).

En este ensayo se tiene una probeta cilíndrica sometida a una carga axial con control de deformación dando un valor aproximado de la resistencia de los suelos cohesivos en términos totales.

Para efectos del desarrollo del ensayo se definió como parámetro de control la densidad seca, para las arcillas se varió entre 1.30 g/cm^3 y 1.99 g/cm^3 , valor que se encuentra dentro del rango característico de este tipo de material y permite un adecuado manejo del material para las condiciones de ensayo.

El molde para compactar el suelo correspondió a una probeta cilíndrica en PVC de dimensiones 37.42 mm de diámetro y 82.86 mm de altura, asegurando que la relación entre la altura y el diámetro es por lo menos de 2. El material se compacto en 10 capas cada una con 20 golpes con una vara de acero para garantizar las mismas condiciones de suministro de energía y compactación en las probetas ensayadas, Figura 26.

La cantidad de material se definió de acuerdo con el peso unitario total del suelo, calculado a partir de la densidad seca y la humedad definida para cada tipo de suelo, y conocido el volumen máximo de la probeta en PVC, se calcula la cantidad de material que se requiere para llenarlo.



Figura 26. Elementos para compactar las muestras. Fuente: Elaboración de la autora.

Una vez las probetas se elaboraron, se registraron los datos correspondientes a diámetros, alturas y pesos, Figura 27; haciendo uso del método B de la norma ASTM D7263 – 09 se determinó la densidad de los especímenes de suelo (ASTM, 2009).

Seguidamente, se calculó la velocidad de carga y se procedió a la ejecución del ensayo en la máquina Multiplex 50E, Figura 28, donde se registraron datos de deformación en mm y carga en KN.



Figura 27. Compactación y elaboración de las probetas. Fuente: Elaboración de la autora.



Figura 28. Equipos para el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente: Elaboración de la autora.

Este ensayo se realizó por su simplicidad y amplio uso en la determinación de la carga última que soporta el suelo, lo cual permite comprender su comportamiento, así mismo permite hacer relación con la resistencia al corte, parámetro de diseño para las obras de ingeniería.

Por último, se elaboraron los diagramas de fases de acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio. Las relaciones volumétricas y gravimétricas entre fases del suelo se derivan en forma analítica a partir de las proporciones relativas de los volúmenes y pesos correspondientes a dichas fases, los cuales se obtuvieron de los ensayos de contenido de humedad y gravedad específica de los sólidos (Correa-Calle, García Orozco, & Escobar García, 2013). La importancia de elaborar este diagrama es que representa las relaciones gravimétricas y volumétricas, lo cual permite estudiar los cambios entre fases que se puede presentar en el suelo con diésel y por tanto, su caracterización para propósitos de obras de ingeniería.

Capítulo VI. Resultados Experimentales y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a los cuatro (4) tipos de suelos finos (arcillas) elegidos para el estudio de sus propiedades geotécnicas y composición mineralógica. Se analizan los resultados de mineralogía, contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, límites de Atterberg, capacidad de intercambio catiónico (CIC), clasificación del suelo de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), resistencia a la compresión inconfiada y diagramas de fases, todos con su correspondiente discusión.

6.1. Discusión de la Fase Experimental

La discusión de la fase experimental se realizó para los cuatro (4) suelos seleccionados para la investigación que correspondieron a arcillas, las cuales fueron caracterizadas a través de ensayos de laboratorio, de acuerdo con la normatividad vigente en Colombia que corresponde a las normas INVIAS y demás referencias presentadas en el capítulo V. Estas muestras cumplieron con el criterio de selección de ser suelos finos (arcillas) homogéneos en su grupo, pero heterogéneos entre sí para evidenciar los diversos comportamientos del suelo con presencia de diésel.

Es importante aclarar que la discusión de resultados se realizó con base en la revisión de la literatura presentada en el capítulo I. En esta revisión se encontró que los autores reportan las normas de ensayo utilizadas en sus estudios, pero no indican la temperatura a la cual se realizaron los ensayos, por lo cual los resultados de estos autores se emplearon para el análisis y discusión de los cuatro (4) tipos de suelos estudiados en esta tesis sin tener en cuenta la variable temperatura, debido a la incertidumbre de este parámetro en la revisión de la literatura. No obstante, se analizaron los resultados de laboratorio de esta tesis teniendo en cuenta la variable temperatura y se deja planteada su validación para futuros trabajos de investigación en esta línea. Con respecto a las muestras sin diésel, estas fueron ensayadas a la temperatura de 110 ± 5 °C de acuerdo con las normas INVIAS, puesto que no tenían

contenido de materia orgánica para ser ensayadas a una temperatura diferente. No obstante, para evidenciar la influencia de la temperatura en las muestras sin contenido orgánico y por ende, sin hidrocarburo, se procedió a ejecutar una serie de ensayos de contenido de humedad para las unidades experimentales A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C, cuyos resultados se presentan en la **Tabla 23** y **Tabla 24** respectivamente.

Tabla 23. Resultados de contenido de humedad a la temperatura de 110 ± 5 °C

Suelo	Temperatura de 110 ± 5 °C				Promedio (ω (%))
	Wr (g)	Wr+sh (g)	Wr+ss (g)	ω (%)	
A	7.25	34.74	25.15	53.58%	53.62%
A	7.222	33.54	24.35	53.65%	
B	7.09	36.58	28.7	36.46%	36.42%
B	7.3	38.68	30.31	36.38%	
C	7.13	37.88	29.83	35.46%	35.44%
C	7.66	38.52	30.45	35.41%	
E	7.6	38.41	35.49	10.47%	10.51%
E	10.78	41.7	38.75	10.55%	

Wr: masa del recipiente; Wr+sh: masa recipiente con suelo húmedo; Wr+ss: peso recipiente más suelo seco

Fuente: Elaboración de la autora.

Tabla 24. Resultados de contenido de humedad a la temperatura de 50 ± 5 °C

Suelo	Temperatura de 50 ± 5 °C				Promedio (ω (%))
	Wr (g)	Wr+sh (g)	Wr+ss (g)	ω (%)	
A	11.12	34.91	26.83	51.43%	51.37%
A	10.71	35.6	27.16	51.31%	
B	6.59	37.54	29.69	33.98%	33.95%
B	10.72	41.72	33.87	33.91%	
C	7.18	37.61	29.9	33.93%	34.00%
C	7.38	38.23	30.39	34.07%	
E	7.28	38.26	35.56	9.55%	9.60%
E	7.01	38.11	35.37	9.66%	

Wr: masa del recipiente; Wr+sh: masa recipiente con suelo húmedo; Wr+ss: peso recipiente más suelo seco

Fuente: Elaboración de la autora.

La incertidumbre de los datos calculados de contenido de humedad para cada uno de los tipos de suelos arcillosos ensayados se encuentra en la **Tabla 25**. De acuerdo con los resultados obtenidos la incertidumbre en el contenido de humedad en promedio es del 5.91%, siendo menores los valores de la propiedad cuando la temperatura de ensayo es de 50 ± 5 °C puesto que a mayor temperatura se presenta una mayor evaporación del agua en la estructura del suelo.

Así mismo, durante el ensayo a la temperatura de 50 ± 5 °C las muestras fueron dejadas en el horno 16 horas adicionales al tiempo de ejecución del ensayo de 110 ± 5 °C, por lo cual se esperaba que el contenido de humedad fuera el mismo, sin embargo, la diferencia no es notoria y su incertidumbre es aceptable teniendo en cuenta la naturaleza de los materiales ensayados y el número de unidades experimentales con las cuales se desarrollaron los ensayos. No obstante, los hornos de ensayo pueden ser uno de los factores en la incertidumbre calculada porque a pesar de ser hornos de temperatura controlada tienen una variación permitida de ± 5 °C. Es importante mencionar que, la norma INVIAS para contenido de humedad no refiere medidas de precisión y sesgo para este ensayo por la complejidad, costo y factibilidad para que diez (10) o más laboratorios participen en la consecución de los datos para este ensayo.

Así mismo, la muestra que presentó la mayor incertidumbre con el 8.60% corresponde a las unidades experimentales tipo E, las cuales son de baja plasticidad y las que tenían en menor contenido de agua.

Tabla 25. Incertidumbre del contenido de humedad en las muestras sin hidrocarburo

Suelo	Incertidumbre (%)
A	4.19
B	6.79
C	4.04
E	8.60
Promedio	5.91

Fuente: Elaboración de la autora.

6.2. Suelo Tipo A

Este suelo corresponde a una arcilla de alta plasticidad de la sabana de Bogotá, con 8.5% de materia orgánica, Tabla 26. En la ejecución del proceso experimental se realizó el proceso de secado al aire de las muestras, de tal forma que no se afectará su composición química ni sus propiedades; luego se procedió a triturar las muestras y adicionarle agua para alcanzar un contenido de humedad del 45%. Con esto se garantizó que las muestras tuvieran una consistencia que facilitará la impregnación del diésel, y se analizará la interacción del agua presente en los poros del suelo con el hidrocarburo.

A pesar de la rigurosidad en el proceso de preparación de las muestras con diésel, se observó la aparición de una colonia de microorganismos, que fueron más notorios para el tratamiento con 6% de diésel, como se aprecia en la Figura 29. Todos los detalles de los resultados de laboratorio para este suelo se presentan en el Anexo 2, Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5.

Tabla 26. Resultados del ensayo de ignición al suelo A, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13

A: masa crisol + suelo seco antes de la ignición	33.00	g
B: masa crisol + suelo seco después de la ignición	31.09	g
C: masa crisol	10.5	g
% materia orgánica	8.5	%

Fuente: Elaboración de la autora.



Figura 29. Muestras del suelo A con diésel y presencia de microorganismos. Fuente: Elaboración de la autora.

6.2.1 Composición mineralógica.

La composición mineralógica de este suelo se determinó por medio de un análisis mineralógico de muestra total (polvo) por difracción de rayos X (DRX), cuyos resultados se presentan en el Anexo 18 y Anexo 19. Se aprecia que la muestra de control tenía como mineral dominante el cuarzo (>50%), presencia de caolinita (5-15%) y trazas de arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5%), para su diferenciación se requiere procesar la muestra con otros tratamientos como etilenglicol y calentamiento a 550°C.

La muestra con tratamiento de 6% de diésel también fue objeto del análisis DRX, para comprobar si el diésel provocaba cambios en sus minerales constituyentes. Los resultados indican que el mineral dominante sigue siendo el cuarzo (>50%), se mantiene la presencia de caolinita (5-15%) y trazas de arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5%). No obstante, se observa en el difractograma una leve atenuación de la caolinita en presencia del diésel.

En conclusión, la muestra control y la muestra con tratamiento de 6% de diésel mantienen el mismo comportamiento en los difractogramas, lo cual evidencia que el diésel no afecta la estructura mineralógica de este suelo, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue corto para producir cambios en la composición química de los minerales, esto también fue reportado por Echeverri et al. (2015); sumado a que la muestra tenía como mineral dominante el cuarzo, un mineral de origen detrítico muy resistente a los procesos de erosión y alteraciones por reacciones químicas, donde posiblemente se requiera de muchos años para que el hidrocarburo produzca cambios.

Es importante aclarar que el tiempo de exposición al hidrocarburo fue de una semana, pero en casos reales el hidrocarburo puede estar presente por periodos prolongados de meses e incluso años, cuando no se reportan los incidentes. Razón por la cual, investigaciones futuras podrían estudiar si las atenuaciones en los minerales constituyentes del suelo con tiempos más prolongados de exposición podrían llegar a cambiar su estructura mineralógica.

6.2.2 Contenido de humedad.

El contenido de humedad de las muestras tipo A se definió teóricamente en 45% para garantizar condiciones de manejabilidad y un contenido de agua idóneo para ser expuesto al hidrocarburo; el agua adicionada se calculó respecto al peso seco de la muestra, se permitió la homogenización y equilibrio entre las partículas del suelo y el agua, posteriormente se adicionó el 1%, 3% y 6% de diésel respecto al peso seco de la muestra.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en la Figura 30, los cuales se desarrollaron a temperaturas de 50 ± 5 °C y 110 ± 5 °C; en ambos casos se evidencia el incremento en el contenido de humedad con la adición del hidrocarburo, representado en una asociación lineal positiva muy fuerte del 82.4% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad a 110 ± 5 °C y 92.3% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad a 50 ± 5 °C.

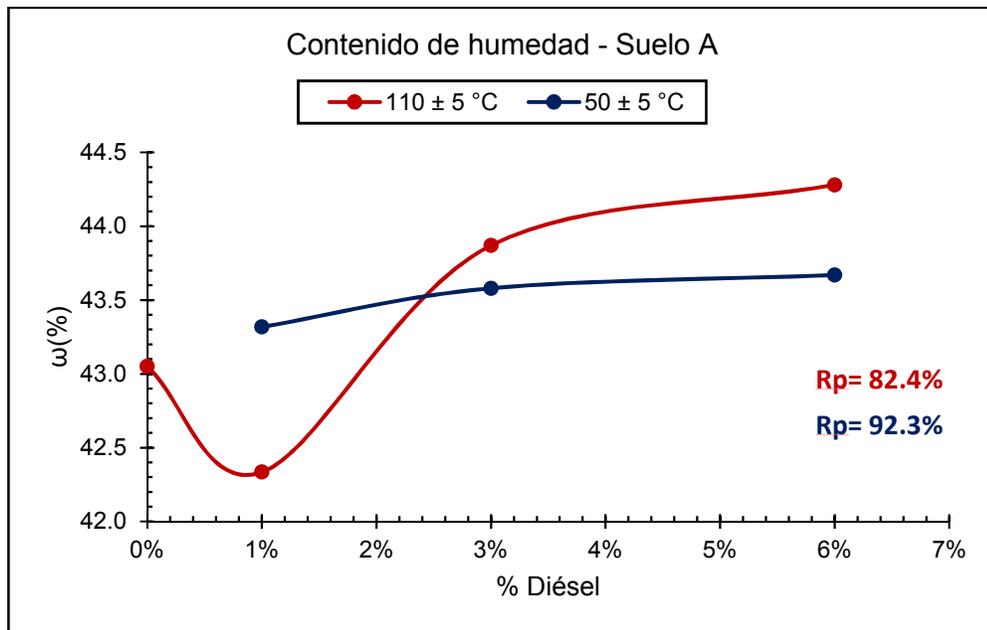


Figura 30. Contenido de humedad del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

El contenido de humedad definido teóricamente fue 45% y el obtenido en el laboratorio fue 43.1% para la muestra control, lo cual representa una variación experimental del 4.22%, la cual es aceptable para los propósitos de la investigación y cuyas pérdidas se pudieron presentar durante el proceso de mezclado y homogenizado del material.

Para el 1% de diésel a la temperatura de 110 ± 5 °C se observa una disminución en el contenido de humedad respecto a la muestra control, lo cual es un indicio que con el 1% de diésel se presentan cambios en el comportamiento del suelo, siendo este porcentaje de diésel un valor clave en la interacción del suelo estudiado con el hidrocarburo. En relación con el 3% de diésel se observa que el valor de la propiedad es mayor para temperatura de ensayo a 110 ± 5 °C con respecto a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C, lo cual se atribuye a que, a mayor temperatura de secado en horno los líquidos presentes en la estructura del suelo tienden a evaporarse más.

Por otra parte, para la muestra secada a 110 ± 5 °C para un tratamiento del 6% de diésel se obtuvo un contenido de humedad del 44.3%, y al secarla a 50 ± 5 °C dicho contenido de humedad disminuye a 43.7%, representado una variación experimental del 1.35%.

Así mismo, la influencia de la temperatura de ensayo cuando las muestras están impregnadas de diésel es un factor para tener en cuenta, pues como se observó en la Figura 30, a mayor temperatura de ejecución del ensayo el contenido de humedad tiende a tener valores mayores, cuya incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 1.46%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación teniendo en cuenta la cantidad de unidades experimentales.

De acuerdo con la revisión de la literatura presentada en el capítulo I, no se encontraron reportes de estudios que evidencien la tendencia a incrementar el contenido de humedad con la adición del diésel, sumado a la falta de investigación en esta propiedad.

Por otra parte, el diésel tiene su punto de ebullición a $151^{\circ}\text{C} - 371^{\circ}\text{C}$, lo que representa que las temperaturas manejadas en los ensayos no producen su calcinación, su efecto en el contenido de humedad del suelo se evidenció junto con la complejidad en la determinación de esta propiedad por la composición particular de las muestras, sumado a que el hidrocarburo presenta pérdidas por evaporación durante el secado y otra parte queda remanente en estado sólido, particularidades que las normas no tienen en consideración.

6.2.3 Gravedad específica de los sólidos.

La gravedad específica de los sólidos se determinó en el laboratorio usando un picnómetro de 500 mL, los resultados para las temperaturas de 110 ± 5 °C y 60 °C se encuentran en la Figura 31. Se observa que la gravedad específica de los sólidos de esta arcilla era 2.53 (sin diésel) y con la adición del 6% de diésel a su estructura disminuyó a 2.33 para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, representando una reducción del 7.90%; y para la temperatura de 60 °C paso de 2.34 para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 2.26 para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, representado una reducción del 3.42%.

Estos resultados ponen en evidencia lo reportado por Walia et al. (2013), donde la gravedad específica disminuyó gradualmente con la adición del diésel como se observa en la Figura 31.

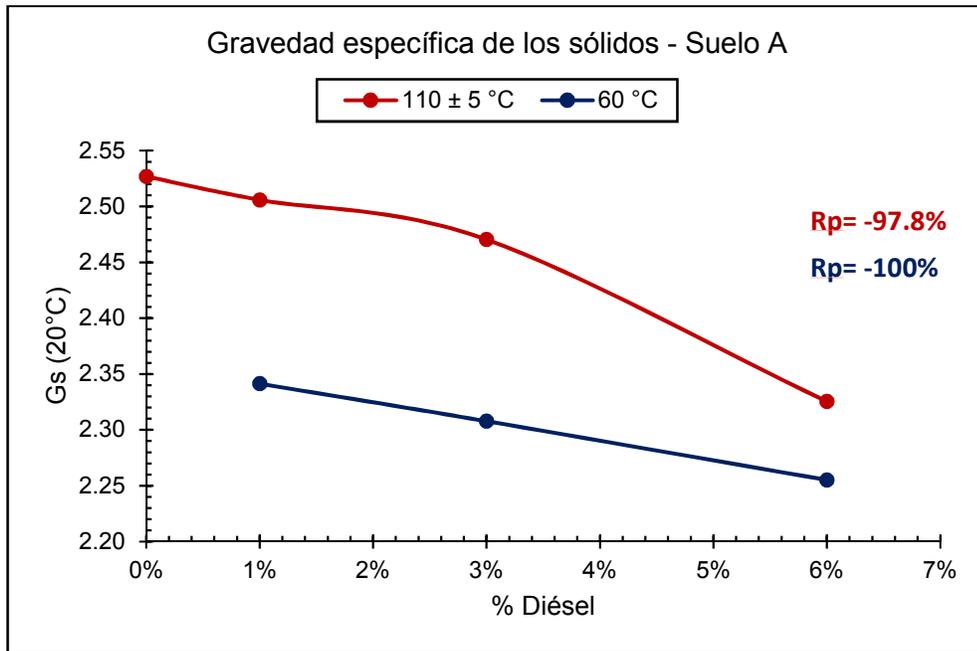


Figura 31. Gravedad específica de los sólidos del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

Es importante resaltar que, el ensayo al realizarse con agua se esperaba un leve aumento de la gravedad específica, debido a que las partículas de arcilla estaban parcialmente hidratadas, sin embargo, la adsorción del diésel a las partículas del suelo produjo que no se presentará una interacción fuerte con el agua agregada al picnómetro y por el contrario disminuyó la fracción sólida.

Adicional, se evidenció que existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 97.8% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de diésel a una temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C; y se tiene una asociación lineal negativa perfecta del 100% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de

diésel a una temperatura de ensayo de 60 °C. Por tanto, en la medida que aumenta el porcentaje de diésel en el suelo la gravedad específica de los sólidos disminuye.

Es preciso indicar que, esta disminución es proporcional en el caso de los resultados de la temperatura de ensayo de 60 °C. Así mismo, la influencia de la temperatura de ensayo es un factor para tener en cuenta, pues como se observó en la Figura 31, a mayor temperatura de ejecución del ensayo de las muestras con diésel la gravedad específica de los sólidos tiene valores mayores, cuya incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 60 °C es del 5.39%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación.

6.2.4 Límites de Atterberg.

El suelo fue analizado de manera preliminar en su condición natural, sin efectuar proceso de secado al aire ni trituración. Estos resultados se observan en la Tabla 27. Al ser una arcilla de la sabana de Bogotá se esperaban valores elevados del límite líquido, en este caso correspondió a 170.4%, el límite plástico fue del 47.5%, el límite de contracción fue del 17.12%, y el índice de plasticidad correspondió al 122.9%.

De acuerdo con estos resultados y según los criterios de plasticidad de la Tabla 16, el suelo se clasificó de muy alta plasticidad. No obstante, al efectuar el proceso de secado al aire, trituración y preparación de las unidades experimentales para el control y la aplicación del tratamiento con diésel, se encontró un drástico cambio en el límite líquido del suelo en cuestión, razón por la cual al clasificar el suelo de acuerdo con el SUCS no clasifica como una arcilla sino como un limo.

Tabla 27. Resultados de límites de Atterberg para el suelo A en estado natural

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13, INV - E 127 -13							
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	13	191	201	9	112	1	
Peso recipiente, W1 (g)	7.20	7.33	7.13	7.01	7.16	267.21	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	16.95	16.65	16.78	13.58	13.61	287.55	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	10.88	10.79	10.65	11.49	11.51	274.68	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	6.07	5.86	6.13	2.09	2.10	12.87	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	3.68	3.46	3.52	4.48	4.35	7.47	
Contenido de humedad, w (%)= Ww/Ws x 100%	%	164.9	169.4	174.1	46.7	48.3	172.3
N° golpes, N	35	26	19	-	-	-	
Límite líquido %	170.4			-	-	-	
Promedio límite plástico, LP %	-	-	-	47.5		-	
Índice de plasticidad= LL-LP %	-	-	-	122.9		-	
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552.1	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	485.99	
Límite de contracción, LC %	-	-	-	-	-	17.12	

Fuente: Elaboración de la autora.

En primer lugar, se analizó el efecto del proceso de secado de acuerdo con la NTC-4630 (NTC, 2012), donde se reporta que los límites líquido y el índice de plasticidad de las muestras analizadas en estado natural son iguales o mayores a los valores obtenidos a partir de muestras secas; lo cual justifica el cambio en los valores del límite líquido en este suelo que en condición húmeda fue de 170.4% y en condición seca al aire fue de 83.3%.

Por otra parte, los suelos cohesivos con presencia de minerales tales como montmorillonita, halloysita, illita, esmectitas y otros minerales, los cuales cambian irreversiblemente sus propiedades al secarse son una explicación al cambio en los

valores del límite líquido y por tanto el cálculo del índice de plasticidad; en donde también se incluyen suelos derivados de cenizas volcánicas y arcillas de alta plasticidad. Este suelo tenía presencia de arcillas 14 Å y era muy plástico, lo cual explica el cambio en los límites de Atterberg.

Así mismo, el suelo que se investigó procede de la sabana de Bogotá, en donde se tienen hallazgos de presencia de suelos derivados de cenizas volcánicas distribuidos aleatoriamente (Lizcano, Herrera, & Santamarina, 2006), estos suelos se caracterizan por tener contenido de materia orgánica, lo cual explicaría el 8.5% de contenido de materia orgánica determinado en las muestras y el cambio en los límites de Atterberg, sin embargo, en el análisis mineralógico no fue detectado, se plantea la hipótesis que su participación era muy baja para estar en el análisis semicuantitativo realizado, y se requeriría de técnicas más especializadas dentro de los análisis mineralógicos para evidenciar si hay trazas o no de cenizas volcánicas.

Lizcano et al. (2006) realizaron un estudio del cambio en los límites de Atterberg de suelos derivados de cenizas volcánicas en estado natural y sometidos a procesos de secado en Colombia, comparando con estudios similares realizados en Ecuador y Nueva Guinea. Los resultados evidencian que los límites adquieren valores altos cuando las muestras se ensayan con su contenido de humedad natural, al realizar el proceso de secado y ensayar las muestras, se produce una reducción en los límites de Atterberg y por ende en el índice de plasticidad.

Por ejemplo, en los estudios realizados en Colombia se tienen suelos con límites líquidos entre 112%-183% en estado natural, y al ser secados al horno pasan a tener valores entre 57%-94%. Sin embargo, los minerales constituyentes del suelo son un factor decisivo en la magnitud del cambio de los límites e incluso secar los suelos a temperatura ambiente puede causar estos cambios drásticos, tal como sucedió con el suelo A usado en esta investigación.

Estos autores reportan que los cambios en los límites se hacen más severos para materiales altamente plásticos y donde se tenga una mayor pérdida del contenido de humedad natural antes del ensayo. Por lo general estos suelos clasifican de acuerdo con el SUCS como limos de alta o baja plasticidad, tal como sucedió con

este suelo durante la fase experimental, era muy plástico (CH) y tenía un contenido de humedad natural elevado, y al ser secado al aire y ensayado clasificó como MH.

No obstante, ante la carencia de información precisa del sitio de extracción de las muestras, no se puede corroborar la hipótesis de las cenizas volcánicas, sumado a que se requeriría un análisis mineralógico más completo para evidenciar si están o no presentes, por ende, se deja planteado para futuras investigaciones.

Por otra parte, durante la fase exploratoria se evidenció la alta plasticidad de este material y un alto contenido de humedad natural antes del secado al aire lo cual explicaría el cambio en los límites de Atterberg, sumado a que su estructura mineralógica con el análisis semicuantitativo de DRX evidenció la presencia de arcillas 14 A°, donde posiblemente se encuentra la esmectita, la cual frente al secado no solo al horno sino a temperatura ambiente en el laboratorio afecta los límites de Atterberg, siendo estos los factores más probables que explican los resultados obtenidos para este suelo A secado al aire.

Los límites de consistencia del suelo son función del contenido de humedad, donde el diésel modificó sustancialmente sus valores, los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. LL, LP, LC e IP del suelo A.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C	110 ± 5 °C	50 ± 5 °C
LL (%)	83.3	89.3	87.7	89.2	86.0	90.7	87.3
LP (%)	43.3	43.2	48.8	42.8	49.6	47.1	51.4
LC (%)	27.4	28.4	26.5	30.2	27.8	32.5	28.9
IP (%)	40.0	46.0	38.9	46.4	36.5	43.6	35.9

Fuente: Elaboración de la autora.

6.2.4.1 Límite líquido.

El límite líquido del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 83.3% en la muestra control a 90.7% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a una temperatura de 110 ± 5 °C, lo que representa una variación experimental del 8.88%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 87.7% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 87.3% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo que representa una variación experimental del 0.46%.

Se observa en la Figura 32 que el incremento del límite líquido a la temperatura de 50 ± 5 °C es menor con respecto a la temperatura de 110 ± 5 °C, por tanto, la temperatura es un factor clave para determinar la magnitud de los cambios en las propiedades del suelo; por esto los reportes de los incidentes con diésel en el suelo deben ser reportados para que la caracterización del suelo sea adecuada. Así mismo, la incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 3.04%.

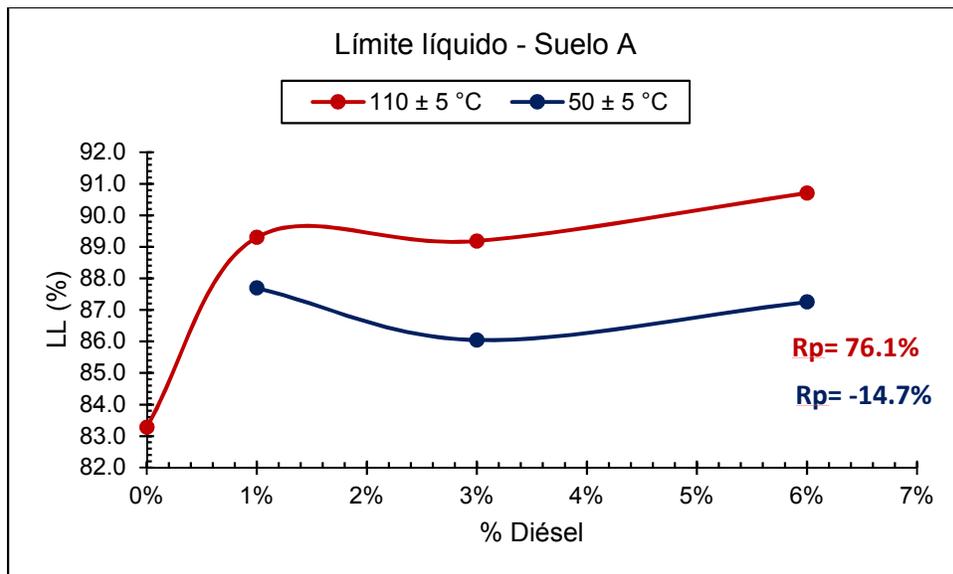


Figura 32. Límite líquido del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva fuerte del 76.1% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal negativa muy débil del 14.7% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Así mismo, se debe resaltar que para una adición de diésel del 1% se presenta una transición, donde el límite líquido aumenta respecto a la muestra control. Al adicionar más diésel al suelo el límite empieza a descender, pero en el tratamiento del 6% de diésel se vuelve a incrementar. Por tanto, en el 1% se presenta entre el suelo y el diésel una interacción que aumenta el límite líquido en un 7.2% a 110 ± 5 °C y 5.3% a 50 ± 5 °C; para el 3% de diésel el límite disminuye y para el 6% vuelve a aumentar. Esto refleja la incertidumbre en el cambio del límite líquido para este suelo dependiendo del porcentaje de diésel en su estructura, donde la tendencia es aumentar el valor de esta propiedad.

Resultados donde se presenta incremento en el límite líquido del suelo estudiado con el incremento en el porcentaje de diésel fue reportado por Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad pasando de 48% a 56%, Zárate (2014) para una arcilla de alta plasticidad pasando de 63.33% a 76% y por Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML pasando de 27.05% a 36.78%.

Zárate (2014) recopiló información donde se reportan casos en que el límite líquido aumenta, esto se justifica por una cohesión adicional que proporcionan los hidrocarburos a las partículas de arcilla, requiriendo de una mayor cantidad de agua durante el ensayo para cambiar la consistencia del suelo.

Esto fue evidenciado durante la realización de los ensayos de laboratorio, en la medida que se aumentaba la cantidad de diésel en el suelo se requería de más agua y mezclado para lograr que la muestra cambie de consistencia. Se observó la disociación del diésel con las partículas de arcilla a través de una película brillante y de apariencia grasosa debido a que el agua desplaza al diésel de la estructura del suelo, por tanto, el hidrocarburo no disminuyó el

espesor de la doble capa difusa de la arcilla, mantenimiento su capacidad de intercambio de cationes.

6.2.4.2 Límite plástico.

El límite plástico del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 43.3% para la muestra control a 47.1% en la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 8.77%.

Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 48.8% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 51.4% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5.33%.

Esto debido a que, las partículas de suelo estaban impregnadas de diésel y se requirió de una mayor cantidad de agua para modificar la consistencia del suelo.

Se observa en la Figura 33 que para la temperatura de 50 ± 5 °C el incremento es ascendente y más notorio que a la temperatura de 110 ± 5 °C; así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 12.58%.

Durante la realización del ensayo el moldeamiento del suelo en rollos fue complejo con el incremento del contenido de diésel, tomándose más tiempo para obtener el límite plástico, esto debido a que el hidrocarburo tomó más tiempo en ser expulsado de la estructura del suelo.

Así mismo, es importante evidenciar que entre el 1% y 3% de diésel el cambio del límite plástico en el suelo tiende a mantenerse constante.

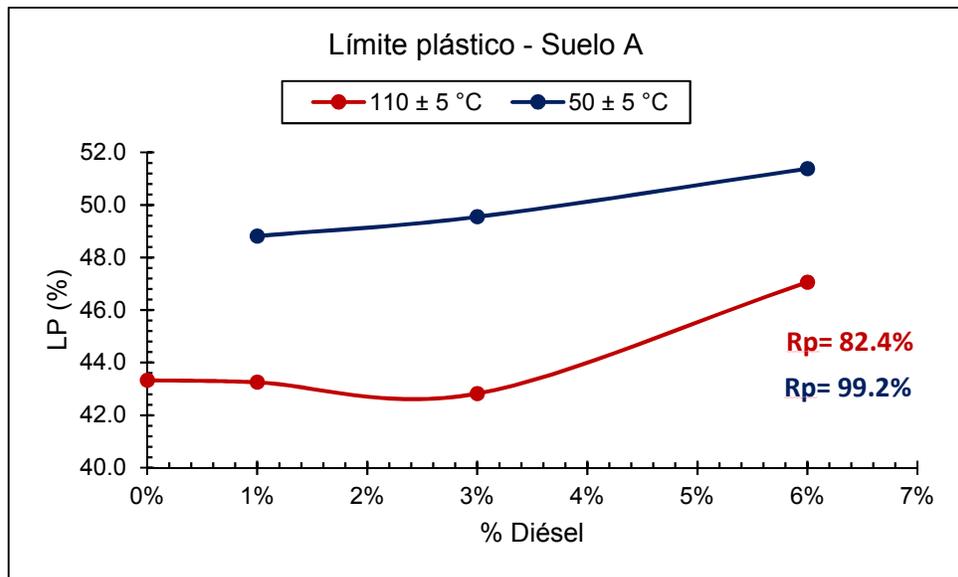


Figura 33. Límite plástico del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 82.4% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 99.2% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C. Este comportamiento de relación positiva entre el límite plástico y el porcentaje de diésel fue reportado por Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad pasando de 23% a 31.5%, Zárate (2014) para una arcilla de alta plasticidad pasando de 25% a 37%, Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML pasando de 20.83% a 32.12%.

6.2.4.3 Límite de contracción.

El límite de contracción del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo como se aprecia en la Figura 34, pasando de 27.4% para la muestra control a 32.5% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a una temperatura del 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 18.61%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 26.5% para la muestra con tratamiento del 1% a 28.9% para el tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 9.06%.

Ningún autor ha reportado este comportamiento de acuerdo con el estado del arte realizado, sumado a que no hay investigaciones referentes a esta propiedad para suelos arcillosos. Sin embargo, este comportamiento se explica puesto que el diésel al adherirse a las partículas de suelo hace que se requiera más agua para cambiar la consistencia del suelo.

Es pertinente mencionar que el límite de contracción depende de la capacidad del suelo para comprimirse y de la presión capilar, se espera que este suelo al tener en su estructura diésel, su capacidad para comprimirse disminuya y las presiones capilares aumenten. Razón por la cual en la Figura 34 se observa el incremento en el valor del límite de contracción con el aumento de la cantidad de diésel en el suelo. Además, se observa que el valor de esta propiedad es mayor a la temperatura de ensayo 110 ± 5 °C frente a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 8.60%.

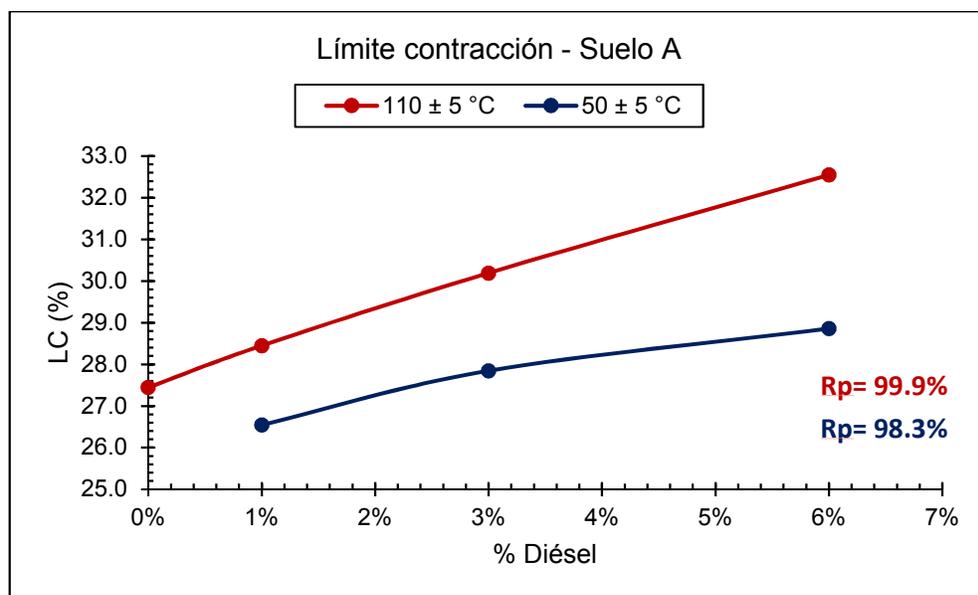


Figura 34. Límite de contracción del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva perfecta del 99.9% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 98.3% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

6.2.4.4 Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad del suelo se calculó con la ecuación 3.14, en donde se pasó de 40.0% para la muestra control a 43.6% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a una temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 9.00%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 38.9% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 35.9% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 7.71%.

Estos resultados indican que, con el incremento del diésel en el suelo, el índice de plasticidad se incrementa y luego desciende para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, pero manteniéndose por encima del valor de la propiedad de la muestra control (0% de diésel); y disminuye el valor de la propiedad para todos los tratamientos ensayados a la temperatura de 50 ± 5 °C.

Según los criterios de plasticidad de la Tabla 16, pasa de alta a muy alta plasticidad para el caso de la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C para el tratamiento del 6% de diésel, mientras que, para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C mantiene una plasticidad alta para el mismo tratamiento. La Figura 35 presenta el cambio en este índice para las temperaturas de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C.

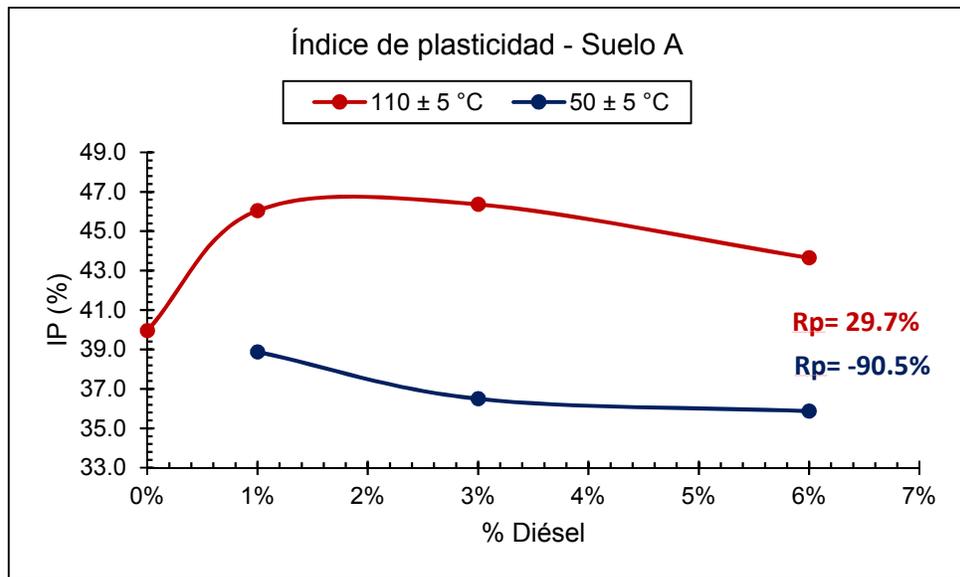


Figura 35. Índice de plasticidad del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva débil del 29.7% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 90.5% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Esto evidencia que el índice de plasticidad para 110 ± 5 °C no tiene una tendencia de comportamiento definido, en contraposición a la temperatura de 50 ± 5 °C donde a medida que se incrementa el porcentaje de diésel en el suelo, el índice de plasticidad desciende. Así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 18.22%, lo cual evidencia la incertidumbre en esta propiedad índice cuando hay presencia de hidrocarburo en la estructura del suelo.

Este comportamiento de descenso en el índice de plasticidad fue reportado por varios autores. Bian et al. (2016) para una arcilla lodosa-limosa reportaron que el índice de plasticidad pasa de 15.7% a 15.6% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Joseph y Hari (2015) para una arcilla reportan que el índice de plasticidad pasa de 51% a 35% con el

incremento del diésel en la estructura del suelo. Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad reportan que el índice de plasticidad pasa de 25% a 24.5% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML reportan que el índice de plasticidad pasa de 6.22% a 4.66% con el incremento del diésel en la estructura del suelo.

6.2.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La capacidad de intercambio catiónico permite tener una aproximación de la capacidad de adsorción del suelo, esta se calculó por medio de correlaciones con el límite líquido, las cuales se encuentran en las ecuaciones 3.12 y 3.13 obteniéndose los resultados presentados en la Figura 36 y Figura 37. Es preciso indicar que, la determinación experimental de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es compleja y se realiza de forma indirecta con procedimientos que se cuestionan, debido a que modifican las propiedades del suelo; por ello las correlaciones son una buena alternativa para cuantificar la CIC.

En la Figura 36 y Figura 37 se observa que con el incremento en la adición de diésel en el suelo aumenta la CIC levemente, lo cual es de esperar por estar en función del límite líquido. Con base en estos resultados y la clasificación del potencial de expansión según la CIC (Tabla 14), se concluye que el suelo según la expresión de Farrar y Coleman es de mediana expansión para la temperatura de 110 ± 5 °C y de 50 ± 5 °C, por tanto, independiente de la temperatura de ensayo el suelo mantiene la misma característica de expansión.

Ahora bien, con la expresión de Smith et al., la clasificación de expansión de este suelo cambia respecto a los resultados de utilizar la expresión de Farrar y Coleman, puesto que independiente de la adición de diésel a la estructura del suelo se clasifica como de muy alta expansión, en donde los valores de CIC tienden a mantenerse constantes, aún con la presencia de diésel.

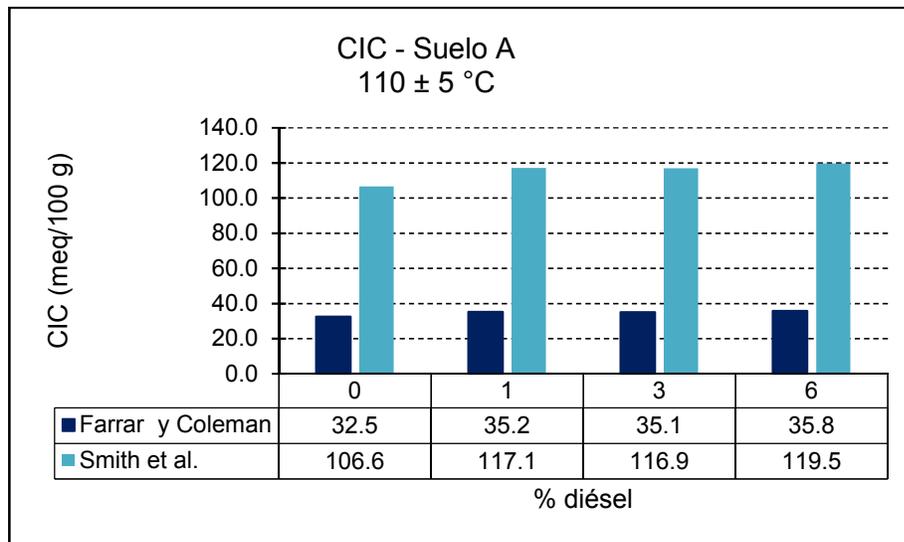


Figura 36. CIC del suelo A con base en los resultados del LL a 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

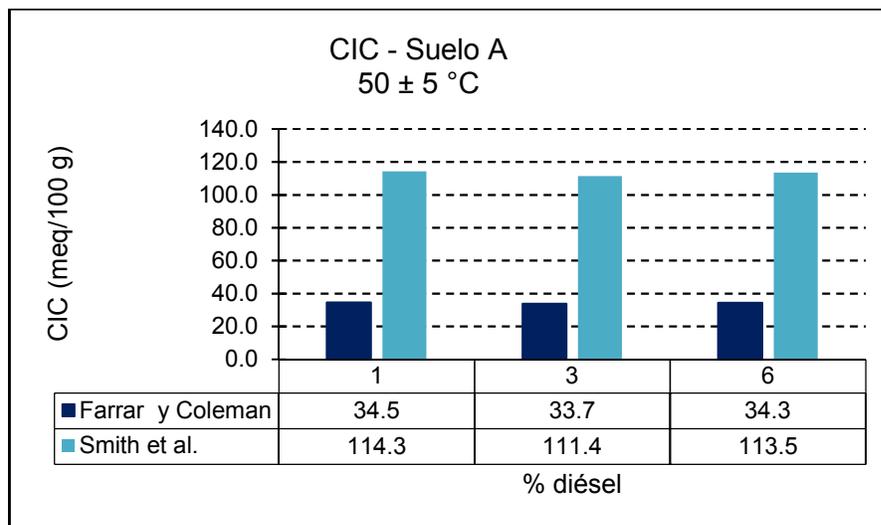


Figura 37. CIC del suelo A con base en los resultados del LL a 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el incremento en la CIC del suelo con el aumento en el contenido de hidrocarburo se debe a que es función de una correlación con el límite líquido. Propiedad que aumento con la cantidad de hidrocarburo, puesto que se requería de una mayor cantidad de agua para el cambio

de consistencia del suelo por la cohesión adicional que ejerce el diésel a las partículas de arcilla.

6.2.6 Clasificación del suelo según SUCS.

Para aplicar el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) se requirió conocer el límite líquido, índice de plasticidad y el tamaño de las partículas, haciendo uso del criterio de la carta de plasticidad de Casagrande, Figura 38. El suelo clasificado como limo de alta compresibilidad (MH) para todos los tratamientos y las temperaturas de ensayo utilizadas, por tanto, el diésel no afecta la clasificación de este suelo. La comparación entre el índice de plasticidad del suelo y el IP de la línea A se presentan en la Figura 39 y Figura 40 para las temperaturas de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizadas dentro de la investigación.

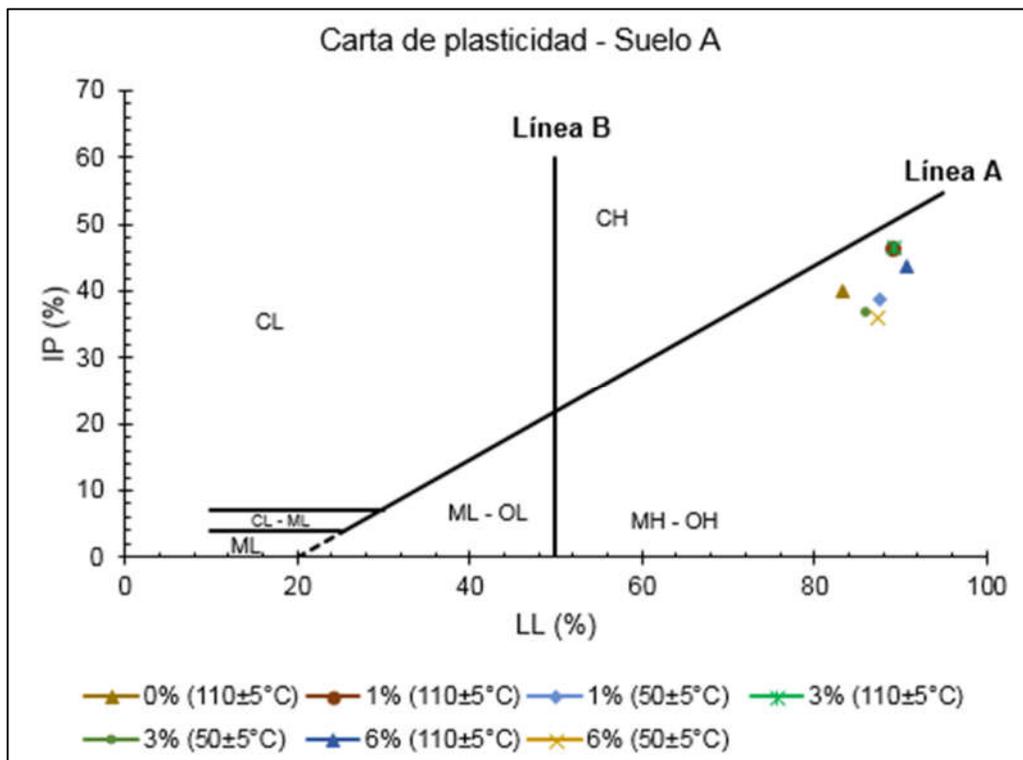


Figura 38. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

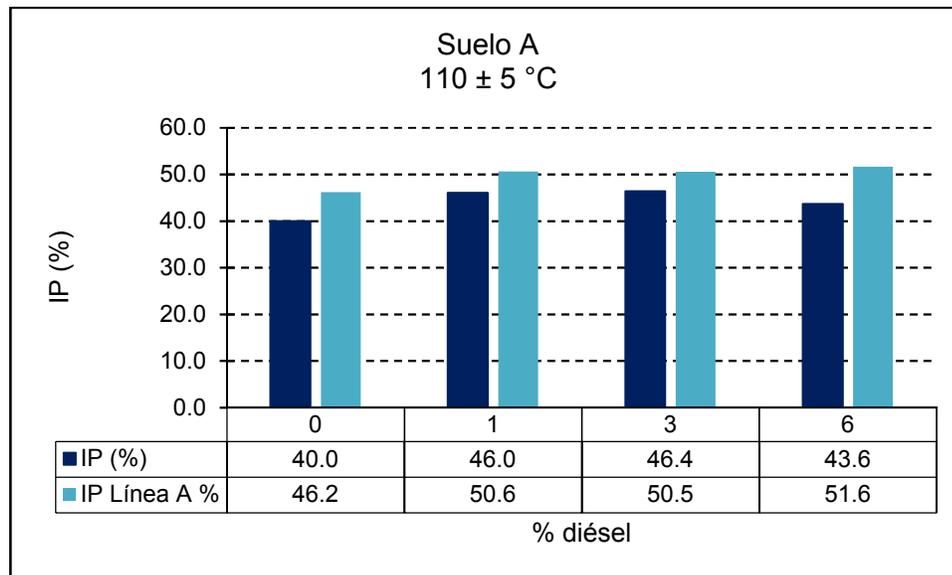


Figura 39. Relación ente el IP del suelo A y el IP de la línea A (110±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

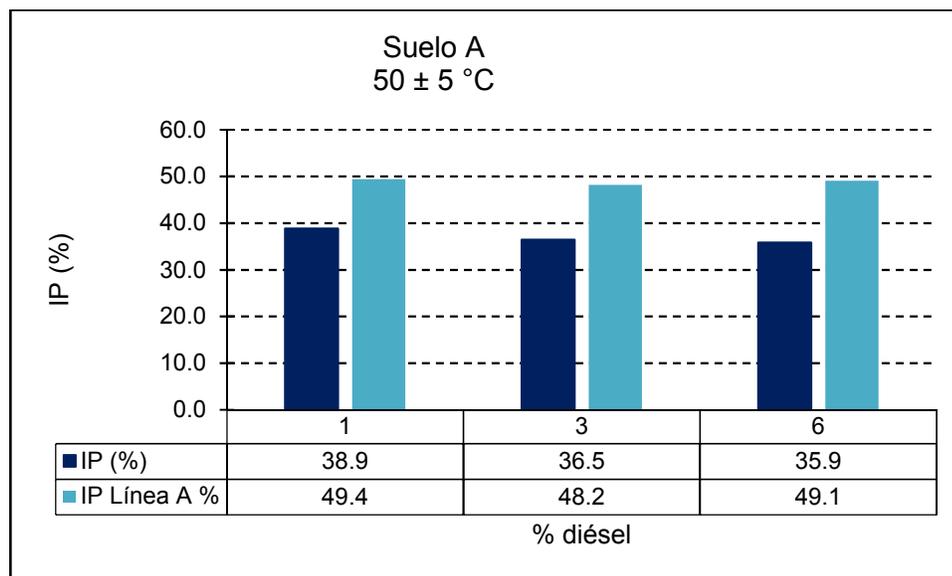


Figura 40. Relación ente el IP del suelo A y el IP de la línea A (50±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

La clasificación del suelo no se vio alterada con la adición del diésel al suelo, no obstante, este suelo no es un limo, es una arcilla, la cual fue identificada visualmente y en un primer ensayo realizado a las muestras en estado natural de límites de

Atterberg, Tabla 27. Las razones de este cambio en la clasificación fueron expuestas en el numeral 6.2.4.

6.2.7 Resistencia a la compresión inconfiada.

Las muestras para la realización de este ensayo tenían porcentajes de diésel de 0%, 1%, 3% y 6%. Se definió como parámetro de control la densidad seca de 1.15 g/cm^3 , de acuerdo con la humedad inicial de las muestras de 43.1%. La densidad total del suelo corresponde a 1.64 g/cm^3 ; para tal fin las probetas se compactaron de acuerdo con el volumen del recipiente de PVC de compactación, 91.13 cm^3 , y la densidad total definida anteriormente.

En la Figura 41 se observa la pérdida de resistencia del suelo en la medida que se incrementa la cantidad de diésel, viéndose reducida la capacidad para deformarse, la cual es más notoria para el tratamiento del 3% de diésel donde alcanza una deformación unitaria del 4.3%. Al trabajar con muestras alteradas la falla que se presenta es frágil.

La resistencia pasa de 178.2 KPa a 121.7 KPa para un tratamiento del 6% de diésel, que representa una reducción del 31.7%. Así mismo, se observa que para el tratamiento del 1% de diésel el suelo alcanza una deformación unitaria del 9.3%, siendo mayor comparada a la muestra sin tratamiento y las muestras con tratamiento del 3% y 6%. La mayor pérdida de resistencia se presenta para el tratamiento del 6% de diésel.

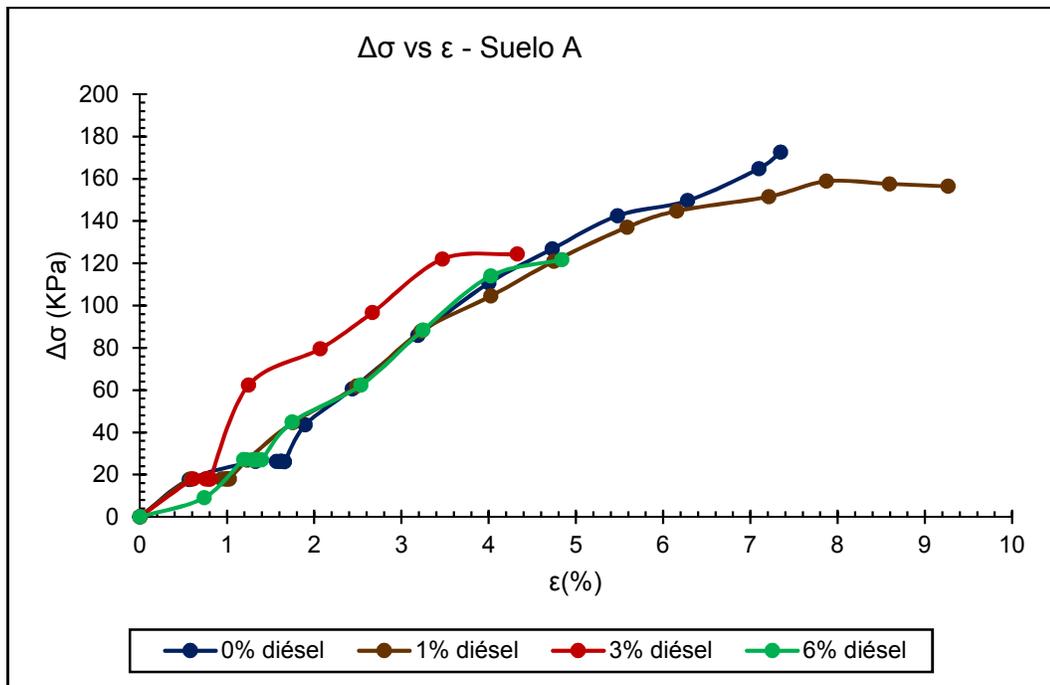


Figura 41. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

Así mismo, se observa que para el tratamiento del 3% de diésel la rigidez del suelo aparentemente aumenta frente a la muestra sin tratamiento y con tratamiento del 1% y 6% de diésel respectivamente, pero la falla se presenta primero con una baja deformación unitaria del 4.3%. La Figura 42 ilustra los valores de resistencia a la compresión confinada y resistencia al corte del suelo A, se aprecia que estos parámetros de resistencia disminuyen con el incremento en el contenido de diésel. Sin embargo, para los tratamientos del 3% y 6%, la disminución de la resistencia empieza a estabilizarse siendo menor en proporción con el tratamiento del 1% de diésel. Este comportamiento de disminución de los parámetros de resistencia fue reportado por Walia et al. (2013) y Nasehi et al. (2016).

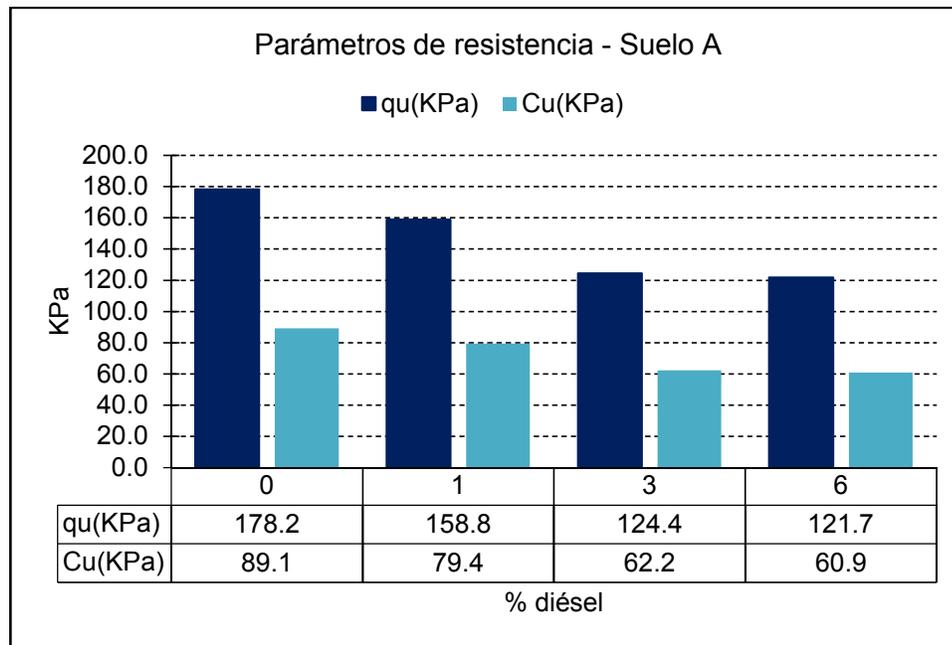


Figura 42. Variación de los parámetros de resistencia del suelo A con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

Este comportamiento se atribuye a que la resistencia al corte del suelo es influenciada por las fuerzas de atracción y repulsión entre sus partículas. Al tener en su estructura diésel, un fluido no polar con baja constante dieléctrica se afecta la doble capa difusa del suelo (Zárate, 2014). El espesor de la doble capa difusa es función de la constante dieléctrica de los fluidos de poros del suelo, por tanto, al tener en los poros agua y diésel se reduce la constante dieléctrica, lo que implica que disminuye la capacidad de los fluidos de separar iones de cargas opuestas y se incrementan las fuerzas de atracción, llevando a una reducción de la resistencia a la compresión inconfiada y la resistencia al corte.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 89.8% entre los parámetros de resistencia (resistencia a la compresión no confinada y la resistencia al corte) y el porcentaje de diésel. Por lo cual, el suelo A sometido al proceso de impregnación de diésel perdió resistencia en la medida que se incrementó la cantidad de diésel en su estructura.

6.2.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.

Las relaciones gravimétricas y volumétricas se obtuvieron con base en los diagramas de fase presentados en el Anexo 26, los cuales se desarrollaron a partir de los datos del ensayo de compresión inconfiada, en el cual se calculó la densidad total del suelo y su humedad. Adicional, el valor de la gravedad específica de los sólidos se determinó en laboratorio y sus resultados fueron presentados en el numeral 6.2.3.

Con estas tres (3) variables conocidas se desarrolló el diagrama de fase para cada porcentaje de hidrocarburo impregnado al suelo y para cada una de las temperaturas de ensayo, donde la cantidad de hidrocarburo se estimó como porcentaje del peso seco del suelo, y la cantidad de agua presente en el suelo como la diferencia entre la masa total y la masa de sólidos más diésel; se realizó de esta forma la estimación para tener como variable de control el peso unitario total del suelo y evidenciar los cambios en su estructura con el incremento del hidrocarburo. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo A.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110±5 °C	110±5 °C	50±5 °C	110±5 °C	50±5 °C	110±5 °C	50±5 °C
γ_t (KN/m ³)	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1
γ_d (KN/m ³)	11.3	11.3	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
e	1.20	1.17	1.04	1.17	1.02	1.04	0.97
η (%)	54.6	54.0	51.1	53.8	50.5	51.1	49.3
S (%)	90.5	90.7	97.4	94.0	99.8	100.0	100.0
ω (%)	43.1	42.3	43.3	43.9	43.6	44.3	43.7

Fuente: Elaboración de la autora.

La relación de vacíos de este suelo A (MH) disminuye en la medida que se incrementa el contenido de diésel en su estructura, debido a que se presenta un aparente aumento del volumen de los sólidos por el aumento de las fuerzas de atracción, originando que las partículas sólidas del suelo se acerquen entre ellas y

generen una cohesión aparente. Esto indica que el diésel fomenta la capacidad del agua para formar estructuras floculadas con las partículas del suelo, tal como lo evidencia Nasehi et al. (2016).

La porosidad al ser función de la relación de vacíos también disminuye con el incremento de diésel en la estructura del suelo. Al igual que en las otras propiedades geotécnicas, la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C produce cambios más notorios frente a la temperatura de 50 ± 5 °C.

El grado de saturación del suelo es función de los vacíos en su estructura, por tanto, el diésel empieza a ocupar los espacios de poros del suelo a tal punto que con un contenido de 6% de diésel, representado en peso seco del suelo, se alcanza la saturación. Esta es una condición extrema que pone en evidencia la pérdida de resistencia del suelo y la formación aparente de estructuras floculadas.

No obstante, al ser estos parámetros determinados a partir de los datos de laboratorio de contenido de humedad y gravedad específica de los sólidos del suelo A (MH), se evidencia una incertidumbre experimental del 1.96%, la cual es aceptable dentro de la validez de los resultados obtenidos de relación de vacíos, porosidad y grado de saturación de las unidades experimentales de este suelo.

6.2.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.

Los análisis de asociación fueron realizados con el software de análisis estadístico SPSS de IBM, usando asociaciones por distancias entre variables y considerando como medida de similitud la correlación de Pearson.

A partir de los ensayos de laboratorio a la temperatura de 110 ± 5 °C se encontró una asociación lineal negativa muy fuerte de la gravedad específica de los sólidos con el límite plástico y límite de contracción del 92.4% y 96.8% respectivamente; una asociación lineal positiva muy fuerte del 80.6% entre el límite líquido y el índice de

plasticidad; y una asociación lineal positiva muy fuerte del 80.1% entre el límite plástico y el límite de contracción.

Por otra parte, con los ensayos de laboratorio a la temperatura de 50 ± 5 °C se encontró una asociación lineal negativa muy fuerte entre la gravedad específica de los sólidos con el límite plástico y el límite líquido del 99.5% y 97.7% respectivamente; una asociación lineal positiva muy fuerte entre la gravedad específica de los sólidos y el índice de plasticidad del 89.2%; una asociación lineal positiva muy fuerte entre el límite plástico y el límite de contracción del 95.1%; una asociación negativa muy fuerte entre el límite plástico y el índice de plasticidad del 84.3%; y una asociación negativa muy fuerte entre el límite de contracción y el índice de plasticidad del 96.8%.

Así mismo, la reducción en la relación de vacíos y la porosidad se asocia a la capacidad del diésel para fomentar que el agua forme estructuras floculadas con las partículas de suelo. Y la saturación aumento en la medida que se incrementó el hidrocarburo porque ocupó los espacios vacíos del suelo.

Los valores obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se incrementan con el aumento en el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo por estar en función del límite líquido, es decir, se obtuvieron de correlaciones que tienen sus propias incertidumbres. Es preciso indicar que, medir en el laboratorio la CIC es bastante complejo y sus procedimientos pueden afectar las propiedades del suelo, puesto que se requiere un método que pueda medir la capacidad de los suelos de adsorber cationes de una solución acuosa con el mismo pH, fuerza iónica, constante dieléctrica y composición, sumado a los componentes químicos de la solución acuosa (por ejemplo, acetato de amonio y acetato de sodio) que pueden interactuar con los suelos finos y modificar sus propiedades, por tanto, no se obtendrían los valores reales de CIC; de ahí que, al emplear las correlaciones se obtuvieron unos estimativos para evidenciar el comportamiento que presentaba el suelo a nivel de interacción química (modificación de su capacidad para retener cationes de cambio) con la presencia del diésel y su influencia en el comportamiento de expansión como se evidenció en el numeral 6.2.5.

La clasificación del suelo es función de los límites líquido y plástico, donde se encuentran cuatro tipos de suelos. Este suelo A clasificó como limo de alta compresibilidad (MH) y no se vio alterada su clasificación con la adición del diésel en las diferentes unidades experimentales, no obstante, al ser variable el comportamiento de los límites producto de la interacción del suelo con el diésel, su plasticidad puede variar y se podría presentar un cambio en la clasificación para los valores más cercanos a las fronteras que se encuentran en la carta de plasticidad con porcentajes mayores del 6% de hidrocarburo en este suelo.

6.3. Suelo Tipo B

Este suelo corresponde a una arcilla de alta plasticidad, se desconoce su lugar de procedencia, con 2.6% de materia orgánica, Tabla 30. En la ejecución del proceso experimental se realizó el proceso de secado al aire de las muestras, de tal forma que no se afectará su composición química ni sus propiedades; luego se procedió a triturar las muestras y adicionarle agua para alcanzar un contenido de humedad del 30%. Con esto se garantizó que las muestras tuvieran una consistencia que facilitará la impregnación del diésel, y se analizará la interacción del agua presente en los poros del suelo con el hidrocarburo. Todos los detalles de los resultados de laboratorio se presentan en el Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 9.

Tabla 30. Resultados del ensayo de ignición al suelo B, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13

A: masa crisol + suelo seco antes de la ignición	31.51	g
B: masa crisol + suelo seco después de la ignición	30.86	g
C: masa crisol	6.53	g
% materia orgánica	2.6	%

Fuente: Elaboración de la autora.

6.3.1 Composición mineralógica.

La composición mineralógica de este suelo se determinó por medio de un análisis mineralógico de muestra total (polvo) por difracción de rayos X (DRX), cuyos resultados se presentan en el Anexo 20 y Anexo 21. Se aprecia que la muestra de control tenía como mineral dominante el cuarzo (>50%), presencia de caolinita (5-15%) y trazas de arcillas 14 Å (<5%), donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita que para su diferenciación se requiere procesar la muestra con otros tratamientos como etilenglicol y calentamiento a 550°C. La muestra con tratamiento de 6% de diésel fue objeto del análisis con DRX, para comprobar si el diésel provocaba cambios en sus minerales constituyentes. Los resultados indican que el mineral dominante sigue siendo el cuarzo (>50%), se mantiene la presencia de caolinita (5-15%) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5%). No obstante, se observa que con la presencia del diésel en la estructura del suelo se atenúan las arcillas 14 Å, pero se presenta una acentuación de la caolinita.

En conclusión, la muestra control y la muestra con tratamiento de 6% de diésel mantienen el mismo comportamiento en los difractogramas, lo cual evidencia que el diésel no afecta la estructura mineralógica de este suelo teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue corto para producir cambios en la composición química de los minerales, esto también fue reportado por Echeverri et al. (2015); sumado a que la muestra tenía como mineral dominante el cuarzo, un mineral de origen detrítico muy resistente a los procesos de erosión y alteraciones por reacciones químicas, donde posiblemente se requiera de muchos años para que el hidrocarburo produzca cambios.

Es importante señalar que el tiempo de exposición al hidrocarburo fue de una semana, pero en casos reales el hidrocarburo puede estar presente por periodos prolongados de meses e incluso años, cuando no se reportan los incidentes. Razón por la cual, investigaciones futuras podrían estudiar si las atenuaciones en los minerales constituyentes del suelo con tiempos más prolongados de exposición podrían llegar a cambiar su estructura mineralógica.

6.3.2 Contenido de humedad.

El contenido de humedad de esta muestra se definió teóricamente en 30% para garantizar condiciones de manejabilidad y un contenido de agua idóneo para ser expuesto al hidrocarburo; el agua adicionada se calculó respecto al peso seco de la muestra, se permitió la homogenización y equilibrio entre las partículas del suelo y el agua, posteriormente se adicionó el 1%, 3% y 6% de diésel respecto al peso seco de la muestra.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en la Figura 43, los cuales se desarrollaron a temperaturas de 50 ± 5 °C y 110 ± 5 °C; en ambos casos se evidencia la tendencia al incremento en el contenido de humedad con la adición del hidrocarburo, representado en una asociación lineal positiva muy fuerte del 82.3% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad a 110 ± 5 °C y una asociación lineal positiva muy fuerte del 97.4% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad a 50 ± 5 °C.

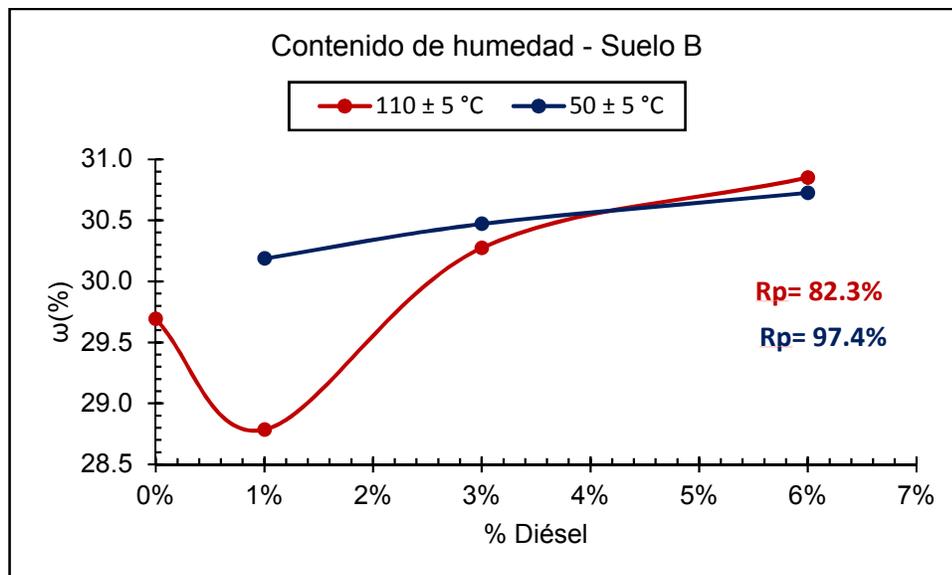


Figura 43. Contenido de humedad del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

Así mismo, el contenido de humedad definido teóricamente fue 30% y el obtenido en el laboratorio fue 29.7% para la muestra control, lo cual representa una variación experimental del 1.00%, la cual es aceptable para los propósitos de la investigación.

En el caso de los ensayos realizados a una temperatura de 50 ± 5 °C se observa el incremento progresivo del contenido de humedad para todos los porcentajes de diésel definidos en la investigación, no obstante, este incremento no es proporcional con la cantidad de hidrocarburo adicionado. Por otra parte, cuando los ensayos se realizaron a una temperatura de 110 ± 5 °C se observa para el tratamiento de 1% de diésel una disminución en el contenido de humedad del 3.03% respecto a la muestra control. Cuando se realizaron los tratamientos del 3% y 6% de diésel respectivamente, se produce un aumento en el contenido de humedad.

En este suelo se observa que a medida que aumenta el hidrocarburo presente en el suelo, el valor del contenido de humedad tiene una menor variación respecto a la temperatura en que se ejecuta el ensayo. Sin embargo, se mantiene la tendencia que, entre mayor temperatura de ensayo, mayor es el valor del contenido de humedad; posiblemente porque se tiene una mayor tasa de evaporación de los líquidos presentes en la estructura del suelo.

Así mismo, la influencia de la temperatura de ensayo es un factor para tener en cuenta, pues como se observó en la Figura 43, a mayor temperatura de ejecución del ensayo el contenido de humedad tiende a tener valores menores hasta el tratamiento de 3% de diésel, pues en el caso del 6% de diésel la tendencia cambia. Esta incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 1.97%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación teniendo en cuenta la cantidad de unidades experimentales.

De acuerdo con la revisión de la literatura presentada en el capítulo I, no se encontraron reportes de estudios que evidencien la tendencia a incrementar el contenido de humedad con la adición del diésel, sumado a la falta de investigación en esta propiedad.

No obstante, el diésel tiene su punto de ebullición a 151°C – 371°C , lo que representa que las temperaturas manejadas en los ensayos no producen su calcinación, su efecto en el contenido de humedad del suelo se evidenció junto a la complejidad en la determinación de esta propiedad por la composición particular de las muestras, sumado a que el hidrocarburo presenta pérdidas por evaporación durante el secado y otra parte queda remanente en estado sólido, situación que las normas no tienen en consideración.

6.3.3 Gravedad específica de los sólidos.

La gravedad específica de los sólidos se determinó en el laboratorio usando un picnómetro de 500 mL, los resultados para las temperaturas de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ y 60°C se encuentran en la Figura 44. Se observa que la gravedad específica de los sólidos de esta arcilla era 2.60 para la muestra control y con la adición del 6% de diésel a su estructura disminuyó a 2.53 para la temperatura de ensayo de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, representando una reducción experimental del 2.94%. Para la temperatura de ensayo de 60°C pasa de 2.54 para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 2.47 para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 2.76%. Estos resultados ponen en evidencia lo reportado por Walia et al. (2013), donde la gravedad específica disminuyó gradualmente con la adición del diésel como se observa en la Figura 44.

Es importante resaltar que, el ensayo al realizarse con agua se esperaba un leve aumento de la gravedad específica, debido a que las partículas de arcilla estaban parcialmente hidratadas, sin embargo, la adsorción del diésel a las partículas del suelo produjo que no se presentará una interacción fuerte con el agua agregada al picnómetro y por el contrario disminuyó la fracción sólida.

Adicional, se evidenció que existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 91.0% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de diésel a una temperatura de ensayo de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$; y se tiene una asociación lineal negativa perfecta del 99.9% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de

diésel a una temperatura de ensayo de 60 °C. Por tanto, en la medida que aumenta el porcentaje de diésel en el suelo la gravedad específica de los sólidos disminuye.

Así mismo, la influencia de la temperatura de ensayo es un factor para tener en cuenta, pues como se observó en la Figura 44, a mayor temperatura de ejecución del ensayo la gravedad específica de los sólidos tiene valores mayores, cuya incertidumbre experimental en la propiedad entre la temperatura de 110±5 °C y 60 °C es del 2.90%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación.

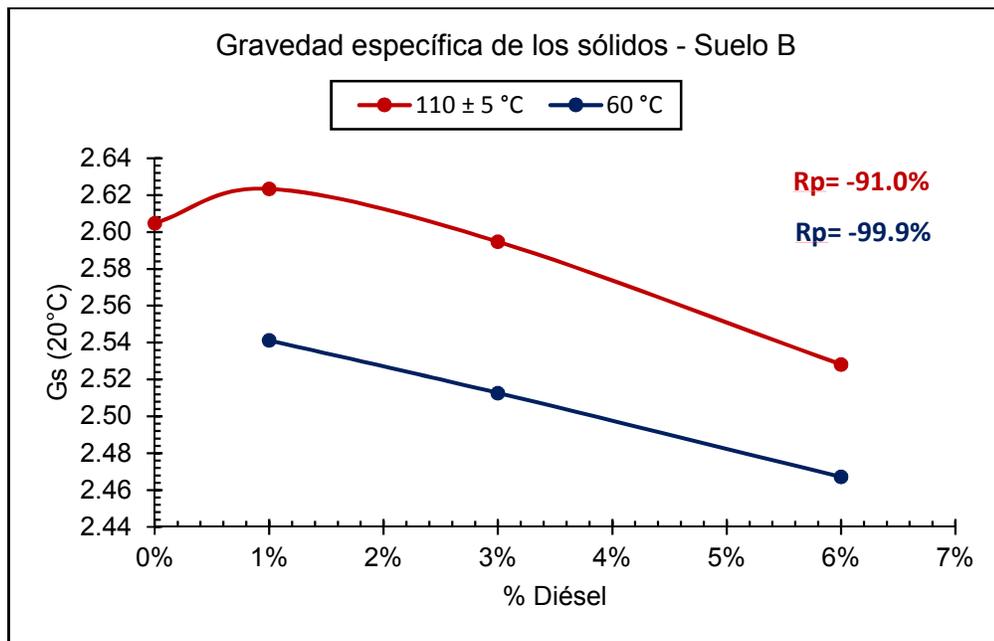


Figura 44. Gravedad específica de los sólidos del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

6.3.4 Límites de Atterberg.

Los límites de consistencia del suelo son función del contenido de humedad, en donde el diésel modificó sustancialmente sus valores, los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31. LL, LP, LC e IP del suelo B.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110±5 °C	110±5 °C	50±5 °C	110±5 °C	50±5 °C	110±5 °C	50±5 °C
LL (%)	87.8	89.9	87.0	82.7	78.6	84.6	81.2
LP (%)	36.0	31.0	32.0	34.9	32.6	34.7	32.1
LC (%)	19.0	24.9	16.0	20.0	16.2	19.0	14.4
IP (%)	51.8	58.9	55.0	47.8	45.9	49.8	49.1

Fuente: Elaboración de la autora.

6.3.4.1 Límite líquido.

El límite líquido del suelo disminuyó con la adición del hidrocarburo, pasando de 87.8% para la muestra control a 84.6% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110±5 °C, lo que representa una variación experimental del 3.64%. Para la temperatura de ensayo de 50±5 °C pasa de 87.0% para el tratamiento del 1% de diésel a 81.2% para el tratamiento del 6% de diésel, representado una variación experimental del 6.67%.

Así mismo, se debe resaltar que para una adición de diésel del 1% se presenta una transición, donde el límite líquido aumenta 2.4% para la temperatura de ensayo de 110±5 °C, con el tratamiento de 3% de diésel el límite líquido disminuye en ambas temperaturas, y con el tratamiento del 6% de diésel el límite líquido aumenta respecto al anterior tratamiento en 2.25% para una temperatura de ensayo de 110±5 °C y 3.29% para la temperatura de ensayo de 50±5 °C. Esto refleja la incertidumbre en el cambio del límite líquido para este suelo dependiendo del porcentaje de diésel en su estructura, donde la tendencia es disminuir el valor de esta propiedad.

Se observa en la Figura 45 que la disminución del límite líquido a la temperatura de 50±5 °C es menor con respecto a la temperatura de 110±5 °C, por tanto, la temperatura es un factor clave para determinar la magnitud

de los cambios en las propiedades del suelo; por esto los reportes de los incidentes con diésel en el suelo deben ser reportados para que la caracterización del suelo sea adecuada. Así mismo, la incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 4.09%.

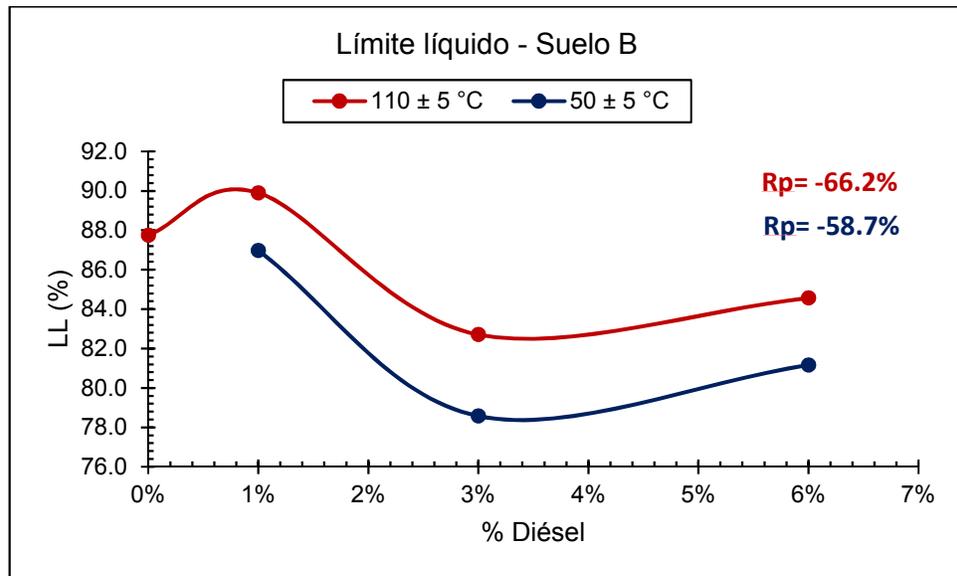


Figura 45. Límite líquido del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa fuerte del 66.2% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal negativa fuerte del 58.7% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Montoro (2011) precisa que el límite líquido en los suelos con contenido de fluidos orgánicos debe disminuir por el aumento en las fuerzas de atracción resultantes entre las partículas, por la reducción del espesor de la capa de agua adsorbida por un proceso de intercambio básico.

Esto ocurrió para este suelo ensayado, debido a que el hidrocarburo cambió las propiedades superficiales de las partículas del suelo y como resultado cambiaron los límites de Atterberg. Así mismo, la interacción del diésel con las partículas del suelo debilitó la interacción entre partículas, donde al

ejecutar los ensayos el espesor de la doble capa de agua se reduce generando la reducción en el límite líquido.

Bian et al. (2016) reportaron disminución en el límite líquido de una arcilla lodosa-limosa con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 36.2% a 35.1%. Liu et al. (2015) reportaron disminución en el límite líquido de una caolinita con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 35% a 28%. Huang & Lu (2014) reportaron disminución en el límite líquido de una arcilla con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 48.5% a 35.4%. Khosravi et al. (2013) reportaron disminución en el límite líquido de una caolinita con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 45% a 40%.

6.3.4.2 Límite plástico.

El límite plástico del suelo disminuyó con la adición del hidrocarburo, pasando de 36.0% para la muestra control a 34.7% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 3.61%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 32.0% para la muestra con tratamiento del 1% a 32.1% para la muestra con tratamiento del 6%, lo cual representa una variación experimental del 0.31%. Este comportamiento se debe a que el diésel cambio las propiedades superficiales de las partículas del suelo, disminuyendo la cantidad requerida de agua para llevar el suelo a su estado plástico.

Se observa en la Figura 46 que para la temperatura de 110 ± 5 °C se presenta un descenso marcado del límite plástico para el tratamiento del 1% de diésel, luego aumenta el valor de la propiedad para 3% de diésel y finalmente, para el 6% de diésel vuelve a disminuir sin ser notorio el cambio. En el caso de la temperatura de 50 ± 5 °C se presenta un aumento para el tratamiento del 1%

de diésel respecto a la temperatura de 110 ± 5 °C, luego aumenta el valor de la propiedad para el tratamiento del 3% de diésel y para el último tratamiento de 6% de diésel, el valor de la propiedad disminuye; precisando que el cambio en la propiedad no es marcado. La incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 3.62%.

Durante la realización del ensayo el moldeamiento del suelo en rollos fue complejo con el incremento del contenido de diésel, tomándose más tiempo para obtener el límite plástico, esto debido a que el hidrocarburo tomó más tiempo en ser expulsado de la estructura del suelo.

Así, mismo es importante evidenciar que el tratamiento del 1% de diésel produce cambios notorios en el valor de la propiedad del límite plástico manifestado en su disminución; y para los otros dos tratamientos los valores de esta propiedad aumentan y luego disminuyen, con esto se demuestra la variabilidad en el límite plástico de este suelo ante la presencia de hidrocarburos como el diésel.

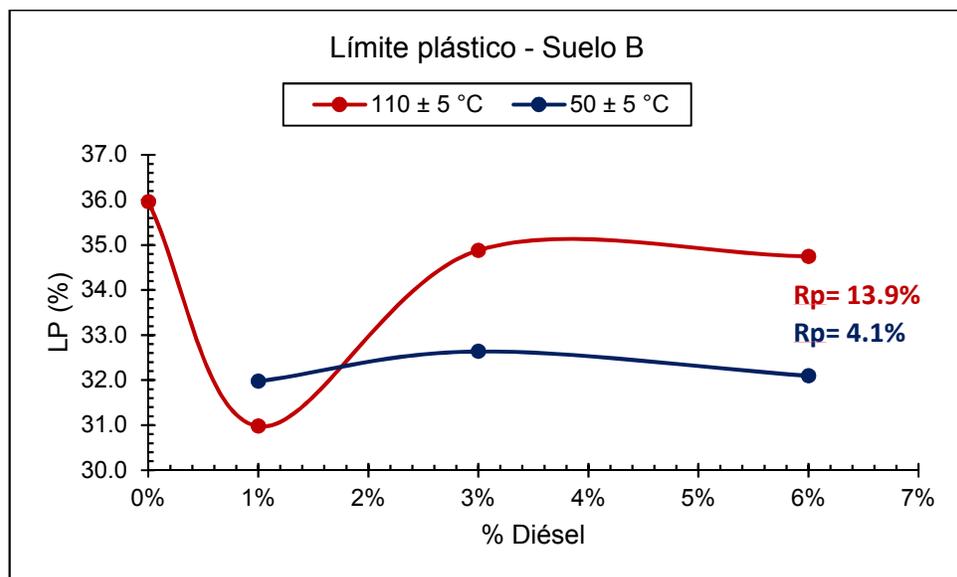


Figura 46. Límite plástico del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

De igual forma, la interacción del diésel con las partículas del suelo debilita la interacción entre partículas, donde al ejecutar los ensayos el espesor de la doble capa de agua se reduce generando la reducción en el límite plástico, facilitando el cambio en el estado de consistencia del suelo.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy débil del 13.9% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva muy débil del 4.1% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C. Estas asociaciones entre el valor de la propiedad y el porcentaje de diésel contenido en la muestra ensayada, simplemente evidencian la incertidumbre en la estimación del comportamiento del límite plástico de este suelo con la variación en los porcentajes de diésel que estuvieran presentes en su estructura.

Bian et al. (2016) reportaron disminución en el límite plástico de una arcilla lodosa-limosa con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 20.5% a 19.5%. Joseph y Hari (2015) reportaron disminución en el límite plástico de una arcilla con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 40% a 35%. Liu et al. (2015) reportaron disminución en el límite plástico de una caolinita con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 19% a 10%. Tong et al. (2012) reportaron disminución en el límite plástico de un *loamclay* con el incremento en el porcentaje de diésel en la estructura del suelo, pasando de 19.1% a 8%.

6.3.4.3 Límite de contracción.

El límite de contracción del suelo disminuyó con la adición del hidrocarburo para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C, pasando de 16% para la muestra control a 14.4% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel como se aprecia en la Figura 47, lo que representa una disminución del 10.0%. Esto se atribuye a que el diésel modificó las propiedades superficiales de las

partículas del suelo haciendo que se requiriera menos cantidad de agua para generar el cambio de consistencia.

No obstante, para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se tiene un comportamiento muy volátil; para el tratamiento del 1% de diésel aumenta el valor del límite de contracción a 24.9%, para el tratamiento del 3% de diésel disminuye a 20% y para el tratamiento del 6% de diésel disminuye a 19%, este último valor es el mismo que se obtuvo para la muestra de control. De acuerdo con estos resultados se puede inferir que el límite de contracción tiende al descenso, sin embargo, para tratamientos entre el 1% y 3% de diésel se observa la volatilidad del comportamiento de este suelo. En el caso de la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se observa el descenso de la propiedad en la medida que se aumenta el porcentaje de diésel presente en la estructura del suelo.

Es pertinente mencionar que, el límite de contracción depende de la capacidad del suelo para comprimirse y de la presión capilar, se esperaba que este suelo al tener en su estructura diésel su capacidad para comprimirse disminuyera y las presiones capilares aumentarían. Pero ocurrió lo contrario, el límite de contracción disminuyó aumentando su capacidad para comprimirse debido a que la interacción del diésel con las partículas del suelo debilitó la interacción entre partículas, donde al ejecutar los ensayos el espesor de la doble capa de agua se reduce generando la reducción en el límite de contracción.

Además, se observa que el valor de esta propiedad es mayor a la temperatura de ensayo 110 ± 5 °C frente a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 26.24%.

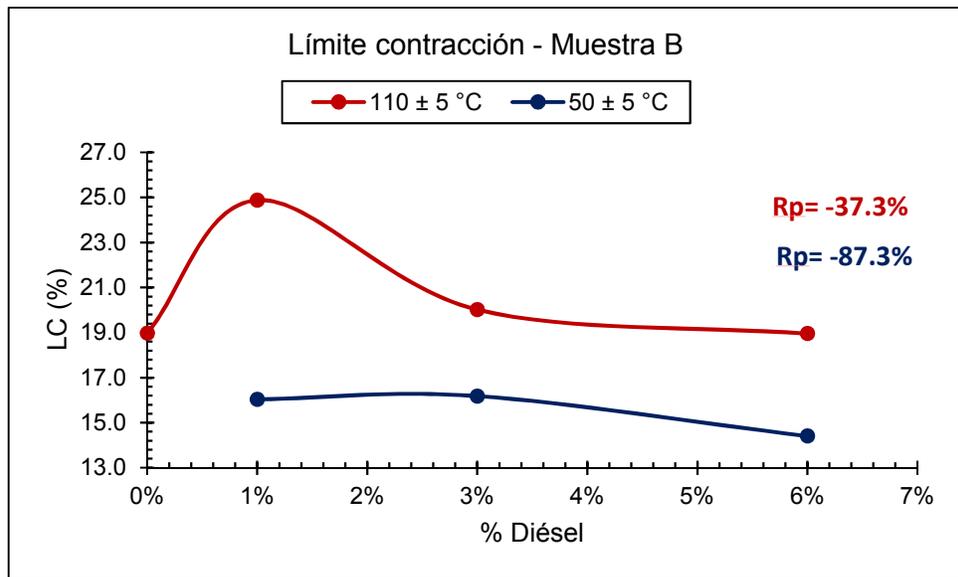


Figura 47. Límite de contracción del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa débil del 37.3% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 87.3% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Solly et al. (2014) reportaron este comportamiento para una arena limosa tratada con diésel pasando de 21.4% a 20.7%, sin embargo, de acuerdo con el estado del arte realizado no hay investigaciones referentes a esta propiedad para suelos arcillosos.

6.3.4.4 Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad del suelo se calculó con la ecuación 3.14, en donde se pasó de 51.8% para la muestra control a 49.8% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a una temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 3.86%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 55.0% para la muestra con tratamiento del

1% de diésel a 49.1% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 10.7%. Estos resultados indican que, con el incremento del diésel en el suelo, el índice de plasticidad disminuye ligeramente.

Según los criterios de plasticidad de la Tabla 16, el suelo presenta muy alta plasticidad, la cual no cambia con el tratamiento del 6% ni con la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C. La Figura 48 presenta el cambio en este índice para las temperaturas de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C.

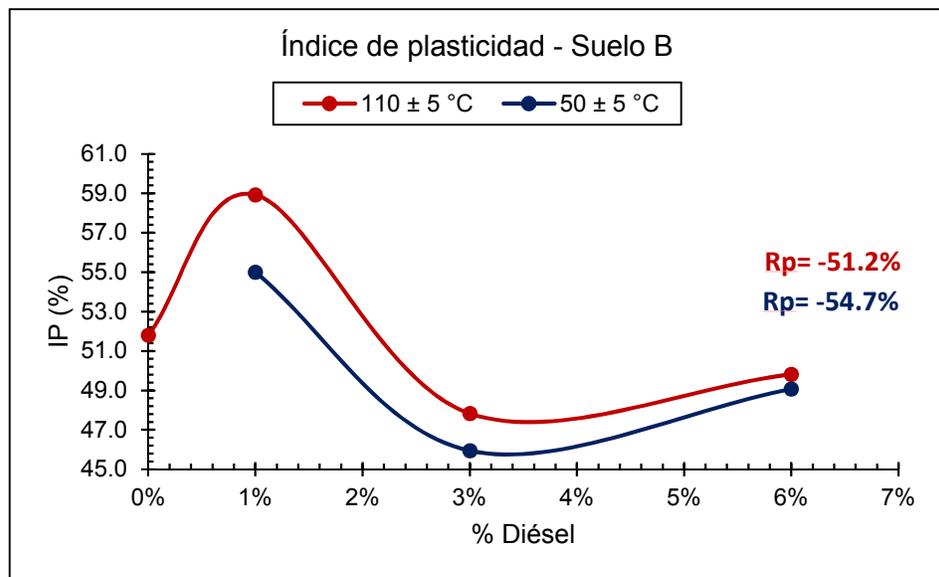


Figura 48. Índice de plasticidad del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa moderada del 51.2% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal negativa moderada del 54.7% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Se observa en la Figura 48 el mismo comportamiento para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C, donde para el tratamiento del 1% de diésel se presenta un incremento del índice de plasticidad respecto a la muestra control, luego desciende para el tratamiento de 3% de diésel y finalmente,

incrementa ligeramente para el tratamiento de 6% de diésel. En general, el tratamiento del 1% de diésel y el 3% de diésel son valores críticos en el comportamiento del índice de plasticidad de este suelo, en donde se observaron las variaciones.

Así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 4.03%, lo cual evidencia la incertidumbre en esta propiedad índice cuando hay presencia de hidrocarburo en la estructura del suelo.

Autores que reportan este comportamiento son: Bian et al. (2016) para una arcilla lodosa-limosa reportaron que el índice de plasticidad pasa de 15.7% a 15.6% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Joseph y Hari (2015) para una arcilla reportan que el índice de plasticidad pasa de 51% a 35% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad reportan que el índice de plasticidad pasa de 25% a 24.5% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML reportan que el índice de plasticidad pasa de 6.22% a 4.66% con el incremento del diésel en la estructura del suelo.

6.3.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La capacidad de intercambio catiónico permite tener una aproximación de la capacidad de adsorción del suelo, esta se calculó con las ecuaciones 3.12 y 3.13 obteniéndose los resultados presentados en la Figura 49 y Figura 50. Es preciso indicar que, la determinación experimental de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es compleja y se realiza de forma indirecta con procedimientos que se cuestionan, debido a que modifican las propiedades del suelo; donde las correlaciones son una buena alternativa para cuantificar la CIC.

En la Figura 49 y Figura 50 se observa que con el incremento en la adición de diésel en el suelo la capacidad de intercambio catiónico (CIC) disminuye levemente, lo cual

es de esperar por estar en función del límite líquido. Con base en estos resultados y la clasificación del potencial de expansión según la CIC (Tabla 14), se concluye que el suelo según la expresión de Farrar y Coleman es de mediana expansión. Por otra parte, independiente de la temperatura de ejecución del ensayo el suelo mantiene su clasificación de mediana expansión.

Ahora bien, con la expresión de Smith et al., la clasificación de expansión de este suelo cambia respecto a los resultados de utilizar la expresión de Farrar y Coleman, puesto que independiente de la adición de diésel la estructura se clasifica como de muy alta expansión, en donde los valores de CIC tienden a disminuir con el incremento de la presencia de diésel. En ambos casos se presenta disminución de la CIC, siendo más notoria la disminución al emplear la expresión de Smith et al.

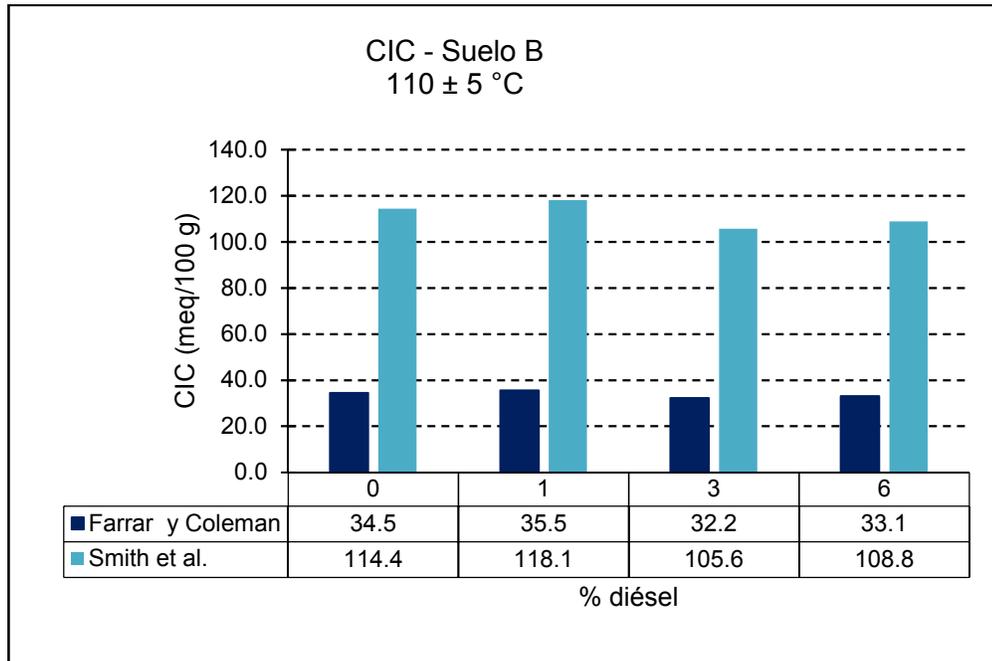


Figura 49. CIC del suelo B con base en los resultados del LL a 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

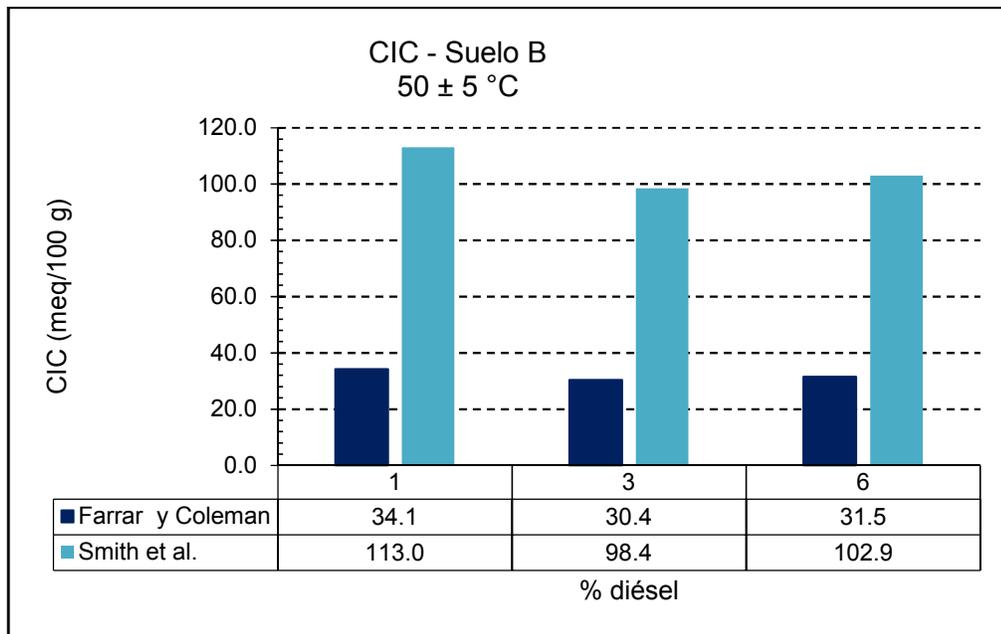


Figura 50. CIC del suelo B con base en los resultados del LL a 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la disminución en la CIC del suelo con el aumento en el contenido de hidrocarburo se debe a que es función de una correlación con el límite líquido. Propiedad que disminuye con la cantidad de hidrocarburo, puesto que se debilitó la interacción entre partículas facilitando el cambio en la consistencia del suelo con menos agua.

6.3.6 Clasificación del suelo según SUCS.

Para aplicar el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) se requirió conocer el límite líquido, índice de plasticidad y el tamaño de las partículas, haciendo uso del criterio de la carta de plasticidad de Casagrande, Figura 51. El suelo clasificado como arcilla de alta compresibilidad (CH) para todos los tratamientos y temperaturas de ensayo utilizadas en la investigación, por tanto, el diésel no afecta la clasificación de este suelo. La comparación entre el índice de plasticidad del suelo y el IP de la línea A se presentan en la Figura 52 y Figura 53 para las temperaturas de 110±5 °C y 50±5 °C utilizadas dentro de la investigación.

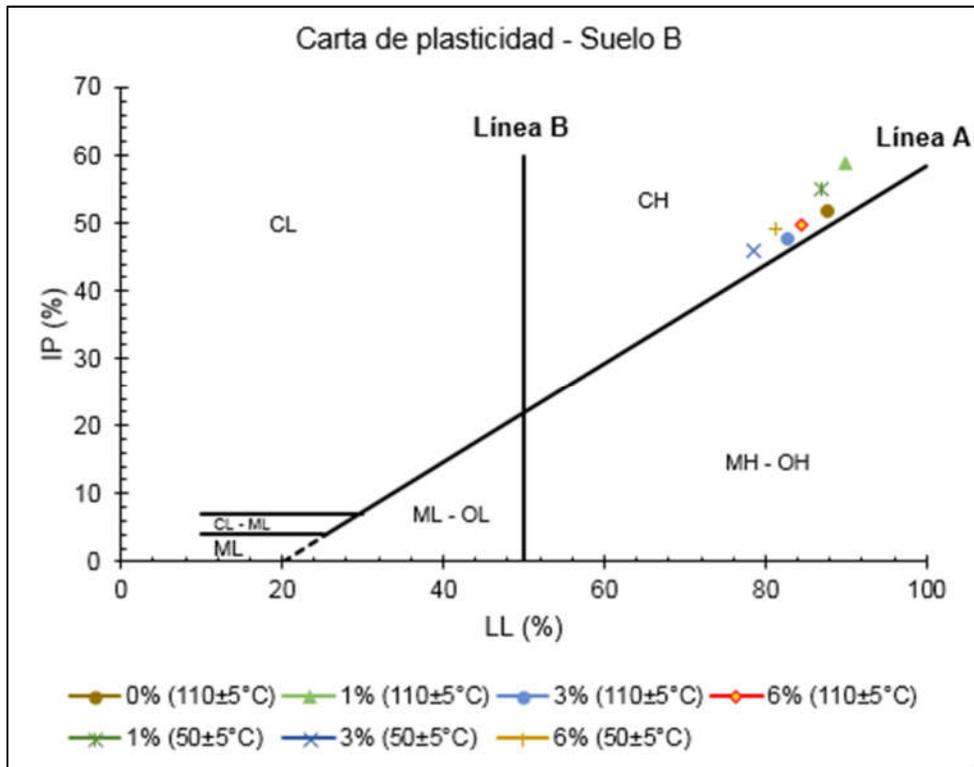


Figura 51. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

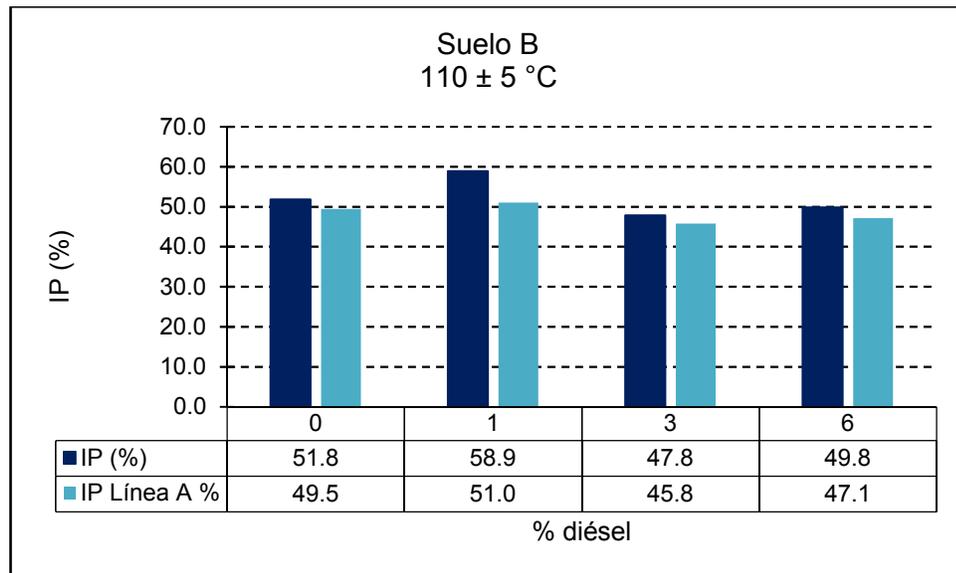


Figura 52. Relación entre el IP del suelo B y el IP de la línea A (110±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

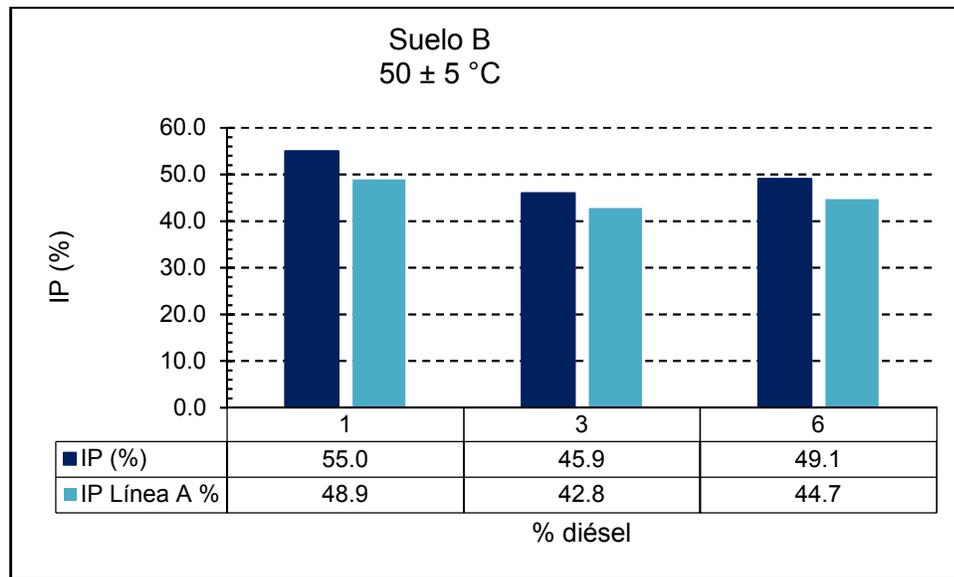


Figura 53. Relación ente el IP del suelo B y el IP de la línea A (50±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

Para el tratamiento de 1% de diésel se observa que los puntos se alejan de la línea A, mientras para los otros tratamientos y la muestra control se acercan a la línea A. De acuerdo con los resultados obtenidos y aplicando los criterios del SUCS no se ve alterada la clasificación de este suelo, se mantiene como una arcilla de alta compresibilidad (CH).

6.3.7 Resistencia a la compresión confinada.

Las muestras para la realización de este ensayo tenían porcentajes de diésel de 0%, 1%, 3% y 6%. Se definió como parámetro de control la densidad seca de 1.39 g/cm³, de acuerdo con la humedad inicial suministrada a las muestras del 29.7%, la densidad total del suelo corresponde a 1.81 g/cm³; para tal fin las probetas se compactaron de acuerdo con el volumen del recipiente de PVC de compactación correspondiente a 91.13 cm³, y la densidad total definida anteriormente.

En la Figura 54 se observa la pérdida de resistencia del suelo para los tratamientos de 3% y 6% de diésel, viéndose reducida la capacidad para deformarse, esto es

más notorio para el tratamiento del 3% de diésel donde alcanza una deformación unitaria del 3.9%. Al trabajar con muestras alteradas la falla que se presenta es frágil. La resistencia pasa de 227.4 KPa a 180.4 KPa para un tratamiento del 6% de diésel, que representa una reducción del 20.7%. Así mismo se observa que para el tratamiento del 1% de diésel el suelo alcanza una deformación unitaria del 6.2%, siendo mayor comparada a la muestra sin tratamiento y las muestras con tratamiento del 3% y 6%, así mismo su resistencia presenta un leve aumento al pasar de 227.4 KPa a 232.1 KPa, lo cual representa un incremento del 2.1%. La mayor pérdida de resistencia se presenta para el tratamiento del 6% de diésel.

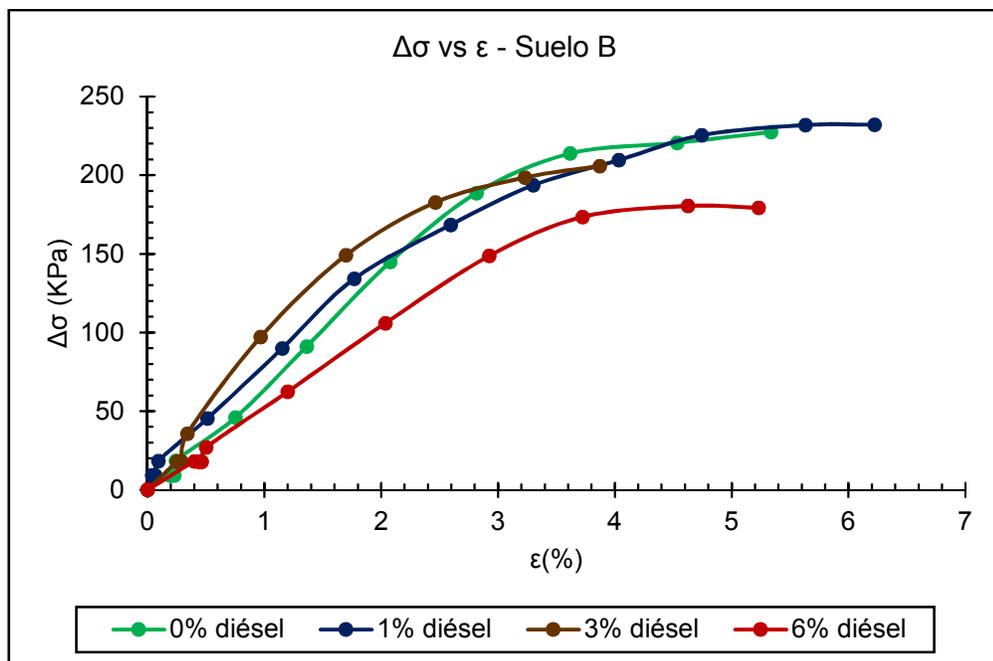


Figura 54. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

Así mismo, se observa que para el tratamiento del 3% de diésel la rigidez del suelo aparentemente aumenta frente a la muestra sin tratamiento y con tratamiento del 1% y 6% de diésel respectivamente, pero la falla se presenta primero con una baja deformación del 3.9%.

La Figura 55 ilustra los valores de resistencia a la compresión confinada y resistencia al corte del suelo B, se aprecia que estos parámetros de resistencia

disminuyen con el incremento en el contenido de diésel en la estructura del suelo. Sin embargo, para el tratamiento del 1% se presenta un leve aumento de la resistencia, y luego desciende para los tratamientos del 3% y 6% de diésel, donde es más notoria la disminución para el mayor porcentaje de diésel empleado en la investigación. Es importante señalar que este comportamiento de disminución de los parámetros de resistencia fue reportado por Walia et al. (2013) y Nasehi et al. (2016).

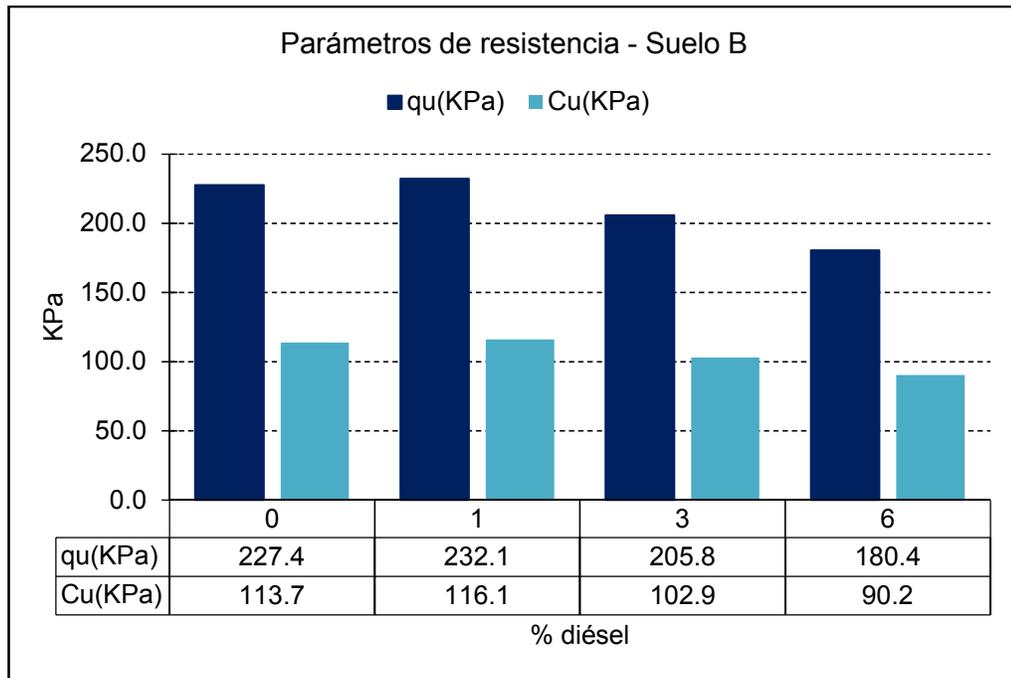


Figura 55. Variación de los parámetros de resistencia del suelo A con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

Este comportamiento se atribuye a que la resistencia al corte del suelo es influenciada por las fuerzas de atracción y repulsión entre sus partículas. Al tener en su estructura diésel, un fluido no polar con baja constante dieléctrica se afecta la doble capa difusa del suelo (Zárate, 2014). El espesor de la doble capa difusa es función de la constante dieléctrica de los fluidos de poros del suelo, por tanto, al tener en los poros agua y diésel se reduce la constante dieléctrica, lo que implica que disminuye la capacidad de los fluidos de separar iones de cargas opuestas y se

incrementan las fuerzas de atracción, llevando a una reducción de la resistencia a la compresión inconfiada y la resistencia al corte.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 97.2% entre los parámetros de resistencia (resistencia a la compresión no confinada y la resistencia al corte) y el porcentaje de diésel. Por lo cual, el suelo B sometido al proceso de impregnación de diésel perdió resistencia en la medida que se incrementó la cantidad de diésel en su estructura, pero para el 1% de diésel presento un ligero aumento del 2.1%.

6.3.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.

Las relaciones gravimétricas y volumétricas se obtuvieron con base en los diagramas de fase presentados en el Anexo 27, los cuales se desarrollaron a partir de los datos del ensayo de compresión inconfiada, en el cual se calculó la densidad total del suelo y su humedad. Adicional, el valor de la gravedad específica de los sólidos se determinó en laboratorio y sus resultados fueron presentados en el numeral 6.3.3.

Con estas tres (3) variables conocidas se desarrolló el diagrama de fase para cada porcentaje de hidrocarburo impregnado al suelo y para cada una de las temperaturas de ensayo, donde la cantidad de hidrocarburo se estimó como porcentaje del peso seco del suelo y la cantidad de agua presente en el suelo como la diferencia entre la masa total y la masa de sólidos más diésel; se realizó de esta forma la estimación para tener como variable de control el peso unitario total del suelo y evidenciar los cambios en su estructura con el incremento del hidrocarburo. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo B.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110 ± 5°C	110 ± 5°C	50 ± 5°C	110 ± 5°C	50 ± 5°C	110 ± 5°C	50 ± 5°C
γ_t (KN/m ³)	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7
γ_d (KN/m ³)	13.7	13.8	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
e	0.87	0.87	0.83	0.87	0.81	0.83	0.78
η (%)	46.5	46.5	45.3	46.5	44.8	45.3	43.9
S (%)	89.1	87.0	92.5	90.4	94.2	94.0	96.8
ω (%)	29.7	28.8	30.2	30.3	30.5	30.9	30.7

Fuente: Elaboración de la autora.

La relación de vacíos de este suelo B (CH) disminuye en la medida que se incrementa el contenido de diésel en su estructura, debido a que se presenta un aparente aumento del volumen de los sólidos por el aumento de las fuerzas de atracción, originando que las partículas sólidas del suelo se acerquen entre ellas y generen una cohesión aparente. Esto indica que el diésel fomenta la capacidad del agua para formar estructuras floculadas con las partículas del suelo, tal como lo evidencia Nasehi et al. (2016).

La porosidad al ser función de la relación de vacíos también disminuye con el incremento de diésel en la estructura del suelo. Al igual que en las otras propiedades geotécnicas, la temperatura de ensayo de 110±5 °C no produce cambios tan notorios en relación con la temperatura de 50±5 °C.

El grado de saturación del suelo es función de los vacíos en su estructura, por tanto, el diésel empieza a ocupar los espacios de poros del suelo a tal punto que con un contenido de 6%, representado en peso seco del suelo, se alcanzan saturaciones del 94% y 96.8% para las temperaturas de ensayo de 110±5 °C y 50±5 °C respectivamente. Al incrementar la saturación del 89.1% a valores cercanos al 100% se pone en evidencia la pérdida de resistencia del suelo y la formación aparente de estructuras floculadas.

No obstante, al ser estos parámetros determinados a partir de los datos de laboratorio de contenido de humedad y gravedad específica de los sólidos del suelo B (CH), se evidencia una incertidumbre experimental del 2.43%, la cual es aceptable dentro de la validez de los resultados obtenidos de relación de vacíos, porosidad y grado de saturación de las unidades experimentales de este suelo.

6.3.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.

Los análisis de asociación fueron realizados con el software de análisis estadístico SPSS de IBM, usando asociaciones por distancias entre variables y considerando como medida de similitud la correlación de Pearson.

Para la temperatura de ensayo de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ se encontró una asociación lineal positiva muy fuerte del 93.1% entre el límite líquido y el índice de plasticidad; una asociación lineal negativa muy fuerte entre el límite plástico y el límite de contracción del 96.8%; una asociación lineal negativa muy fuerte entre el límite plástico y el índice de plasticidad del 83.8%; y una asociación lineal positiva muy fuerte entre el límite de contracción y el índice de plasticidad del 87.9%.

Respecto a la temperatura de ensayo de $50\pm 5^{\circ}\text{C}$ se encontró una asociación lineal positiva muy fuerte entre la gravedad específica de los sólidos y el límite de contracción del 85.6%; una asociación lineal negativa muy fuerte entre el límite líquido y el límite plástico del 83.3%; una asociación lineal positiva perfecta del 99.9% entre el límite líquido y el índice de plasticidad; y una asociación lineal negativa muy fuerte entre el límite plástico y el índice de plasticidad del 85.9%.

Así mismo, la reducción en la relación de vacíos y la porosidad se asocia a la capacidad del diésel para fomentar que el agua forme estructuras floculadas con las partículas de suelo. Y la saturación aumento en la medida que se incrementó el hidrocarburo porque ocupó los espacios vacíos del suelo.

Los valores obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) disminuyen con el aumento en el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo por estar en función del límite líquido, es decir, se obtuvieron de correlaciones que tienen sus propias incertidumbres. Es preciso indicar que, medir en el laboratorio la CIC es bastante complejo y sus procedimientos pueden afectar las propiedades del suelo, puesto que se requiere un método que pueda medir la capacidad de los suelos de adsorber cationes de una solución acuosa con el mismo pH, fuerza iónica, constante dieléctrica y composición, sumado a los componentes químicos de la solución acuosa (por ejemplo, acetato de amonio y acetato de sodio) que pueden interactuar con los suelos finos y modificar sus propiedades, por tanto, no se obtendrían los valores reales de CIC; de ahí que, al emplear las correlaciones se obtuvieron unos estimativos para evidenciar el comportamiento que presentaba el suelo a nivel de interacción química (modificación de su capacidad para retener cationes de cambio) con la presencia del diésel y su influencia en el comportamiento de expansión como se evidenció en el numeral 6.3.5.

La clasificación del suelo es función de los límites líquido y plástico, donde se encuentran cuatro tipos de suelos. Este suelo B clasificó como arcilla de alta compresibilidad (CH) y no se vio alterada su clasificación con la adición del diésel en las diferentes unidades experimentales, no obstante, al ser variable el comportamiento de los límites producto de la interacción del suelo con el diésel, su plasticidad puede variar y se podría presentar un cambio en la clasificación para los valores más cercanos a las fronteras que se encuentran en la carta de plasticidad con porcentajes mayores del 6% de hidrocarburo presentes en el suelo, donde podría clasificar como un limo de alta plasticidad (MH) al fomentarse la agrupación de las partículas del suelo.

6.4. Suelo Tipo C

Este suelo corresponde a una arcilla de alta plasticidad, se desconoce su lugar de procedencia, con 4.2% de materia orgánica, Tabla 33. Para efectos de la investigación fue secado al aire, triturado y caracterizado para un contenido de

humedad del 30%, de tal forma que se facilitarán las condiciones para la impregnación del diésel y se estudiará su comportamiento con el agua presente en la estructura del suelo. Todos los detalles de los resultados de laboratorio se presentan en el Anexo 10, Anexo 11, Anexo 12 y Anexo 13.

Tabla 33. Resultados del ensayo de ignición al suelo C, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13

A: masa crisol + suelo seco antes de la ignición	43.06	g
B: masa crisol + suelo seco después de la ignición	41.73	g
C: masa crisol	11.26	g
% materia orgánica	4.2	%

Fuente: Elaboración de la autora.

6.4.1 Composición mineralógica.

La composición mineralógica de este suelo se determinó por medio de un análisis mineralógico de muestra total (polvo) por difracción de rayos X (DRX), cuyos resultados se presentan en el Anexo 22 y Anexo 23. Se aprecia que la muestra de control tenía como mineral dominante el cuarzo (>50%), presencia de caolinita (5-15%) y trazas de arcillas 14 Å (<5%), donde se encuentran escmectita, vermiculita y clorita que para su diferenciación se requiere procesar la muestra con otros tratamientos como etilenglicol y calentamiento a 550°C. La muestra con tratamiento de 6% de diésel fue objeto del análisis con DRX, para comprobar si el diésel provocaba cambios en sus minerales constituyentes. Los resultados indican que el mineral dominante sigue siendo el cuarzo (>50%), se mantiene la presencia de caolinita (5-15%) y arcillas 14 Å, donde se encuentran escmectita, vermiculita y clorita (<5%). No obstante, se observa que con la presencia del diésel en la estructura del suelo se atenúan las arcillas 14 Å y la caolinita.

En conclusión, la muestra control y la muestra con tratamiento de 6% de diésel mantienen el mismo comportamiento en los difractogramas, lo cual evidencia que el diésel no afecta la estructura mineralógica de este suelo teniendo en cuenta que el

periodo de exposición fue corto para producir cambios en la composición química de los minerales, esto también fue reportado por Echeverri et al. (2015); sumado a que la muestra tenía como mineral dominante el cuarzo, un mineral de origen detrítico muy resistente a los procesos de erosión y alteraciones por reacciones químicas, donde posiblemente se requiera de muchos años para que el hidrocarburo produzca cambios.

Es importante señalar que el tiempo de exposición al hidrocarburo fue de una semana, pero en casos reales el hidrocarburo puede estar presente por periodos prolongados de meses e incluso años, cuando no se reportan los incidentes. Razón por la cual, investigaciones futuras podrían estudiar si las atenuaciones en los minerales constituyentes del suelo con tiempos más prolongados de exposición podrían llegar a cambiar su estructura mineralógica.

6.4.2 Contenido de humedad.

El contenido de humedad de esta muestra se definió teóricamente en 30% para garantizar condiciones de manejabilidad y un contenido de agua idóneo para ser expuesto al diésel; el agua adicionada se calculó respecto al peso seco de la muestra, se permitió la homogenización y equilibrio entre las partículas del suelo y el agua, posteriormente se adicionó el 1%, 3% y 6% de diésel respecto al peso seco de la muestra.

El contenido de humedad definido teóricamente fue 30% y el obtenido en el laboratorio fue 30.3%, lo cual representa una variación experimental del 1.00%, la cual es aceptable para los propósitos de la investigación.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en la Figura 56, los cuales se desarrollaron a temperaturas de 50 ± 5 °C y 110 ± 5 °C; para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se evidencia la tendencia al incremento en el contenido de humedad con la adición del hidrocarburo, representado en una asociación lineal positiva muy fuerte del 96.3% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad.

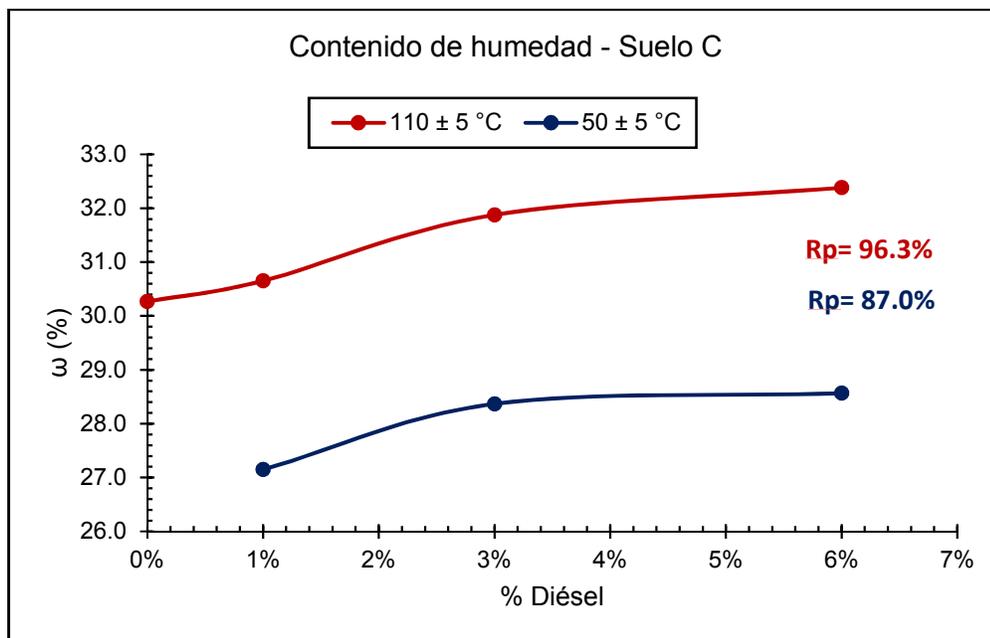


Figura 56. Contenido de humedad del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

En el caso de los ensayos realizados a una temperatura de 50 ± 5 °C se observa el descenso del contenido de humedad con la adición del hidrocarburo respecto a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Para el tratamiento del 3% de diésel se observa un aumento de la propiedad representado en un 4.58% respecto al tratamiento del 1% de diésel; para el tratamiento del 6% de diésel la propiedad aumenta un 5.54% respecto al tratamiento del 1% de diésel. Analizando estos datos se encuentra una asociación lineal positiva muy fuerte del 87.0% entre el contenido de humedad y el porcentaje de diésel que contiene la muestra.

En este suelo se mantiene la tendencia que, entre mayor temperatura de ensayo, mayor es el valor del contenido de humedad; posiblemente porque se tiene una mayor tasa de evaporación de los líquidos presentes la estructura del suelo. Esta incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 11.41%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación teniendo en cuenta la cantidad de unidades experimentales.

De acuerdo con la revisión de la literatura presentada en el capítulo I, no se encontraron reportes de estudios que evidencien la tendencia a incrementar el

contenido de humedad con la adición del diésel, sumado a la falta de investigación en esta propiedad.

No obstante, el diésel tiene su punto de ebullición a 151°C – 371°C, lo que representa que las temperaturas manejadas en los ensayos no producen su calcinación, su efecto en el contenido de humedad del suelo se evidenció junto a la complejidad en la determinación de esta propiedad por la composición particular de las muestras, sumado a que el hidrocarburo presenta pérdidas por evaporación durante el secado y otra parte queda remanente en estado sólido, para lo cual las normas no lo consideran.

6.4.3 Gravedad específica de los sólidos.

La gravedad específica de los sólidos se determinó en el laboratorio usando un picnómetro de 500 mL, los resultados para las temperaturas de ensayo de 110±5 °C y 60 °C se encuentran en la Figura 57. Se observa que la gravedad específica de los sólidos de esta arcilla era 2.69 para la muestra control y con la adición del 6% de diésel a su estructura disminuyó a 2.09 para la temperatura de ensayo de 110±5 °C, lo cual representa una reducción del 22.3%. Para la temperatura de ensayo de 60 °C pasa de 2.53 para el tratamiento del 1% de diésel a 2.38 para el tratamiento del 6% de diésel, representando una reducción del 5.93%. Estos resultados ponen en evidencia lo reportado por Walia et al. (2013), donde la gravedad específica disminuyó en la medida que se incrementaba la adición del diésel, como se observa en la Figura 57.

Es importante resaltar que, el ensayo al realizarse con agua se esperaba un leve aumento de la gravedad específica, debido a que las partículas de arcilla estaban parcialmente hidratadas, sin embargo, la adsorción del diésel a las partículas del suelo produjo que no se presentará una interacción fuerte con el agua agregada al picnómetro y por el contrario disminuyó la fracción sólida.

Adicional, se evidenció que existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 96.1% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de diésel a una

temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C; y se tiene una asociación lineal negativa muy fuerte del 83.7% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de diésel a una temperatura de ensayo de 60 °C. Por tanto, en la medida que aumenta el porcentaje de diésel en el suelo la gravedad específica de los sólidos disminuye.

Así mismo, la influencia de la temperatura de ensayo es un factor a tener en cuenta, pues como se observó en la Figura 41, a mayor temperatura de ejecución del ensayo la gravedad específica de los sólidos tiene valores mayores, exceptuando el tratamiento del 6% de diésel, cuya incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 60 °C es del 7.97%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación teniendo en cuenta la cantidad de unidades experimentales.

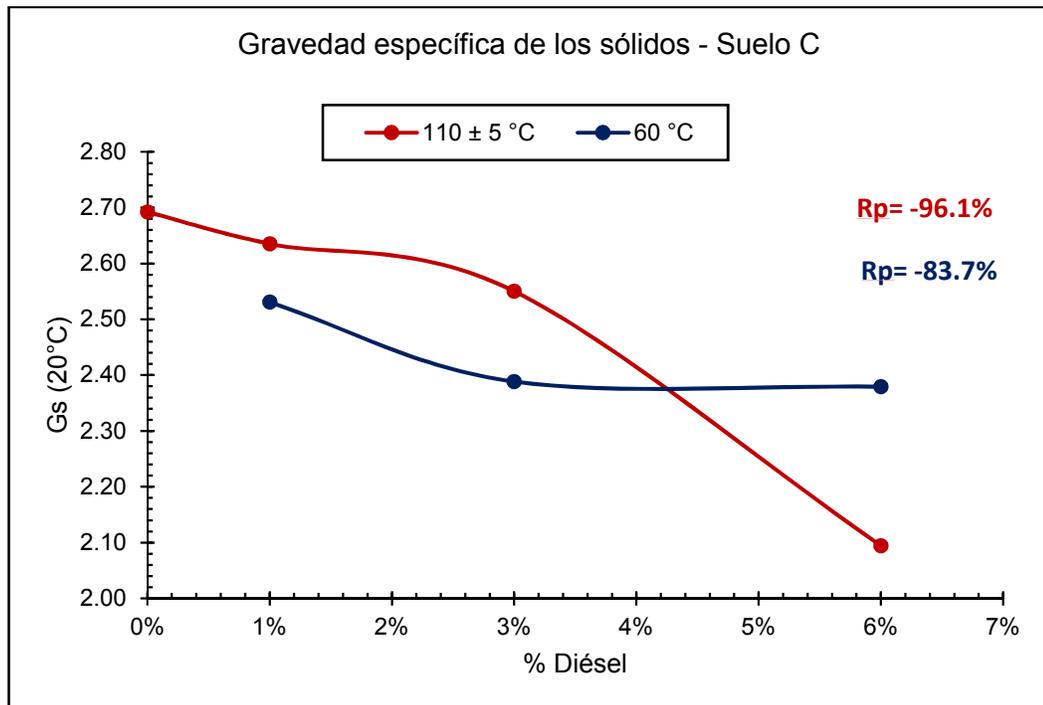


Figura 57. Gravedad específica de los sólidos del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

6.4.4 Límites de Atterberg.

Los límites de consistencia del suelo son función del contenido de humedad, en donde el diésel modificó sustancialmente sus valores, los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. LL, LP, LC e IP del suelo C.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110±5°C	110±5°C	50±5°C	110±5°C	50±5°C	110±5°C	50±5°C
LL	59.2	59.9	55.0	64.8	58.6	65.0	62.3
LP	29.7	28.6	30.0	30.0	29.5	31.1	30.9
LC	23.9	23.1	19.8	22.4	20.0	22.3	26.0
IP	29.5	31.3	25.0	34.8	29.1	33.9	31.4

Fuente: Elaboración de la autora.

6.4.4.1 Límite líquido.

El límite líquido del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 59.2% para la muestra control a 65.0% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110±5 °C, lo cual representa una variación experimental del 9.80%. Para la temperatura de ensayo de 50±5 °C pasa de 55% para el tratamiento del 1% de diésel a 62.3% para el tratamiento del 6% de diésel, representando una variación experimental del 13.27%.

Se observa en la Figura 58 que el incremento del límite líquido a la temperatura de 50±5 °C es menor con respecto a la temperatura de 110±5 °C, por tanto, la temperatura es un factor clave para determinar la magnitud de los cambios en las propiedades del suelo; por esto los reportes de los incidentes con diésel en el suelo deben ser reportados para que la caracterización del suelo sea adecuada. Así mismo, la incertidumbre

experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 7.33%.

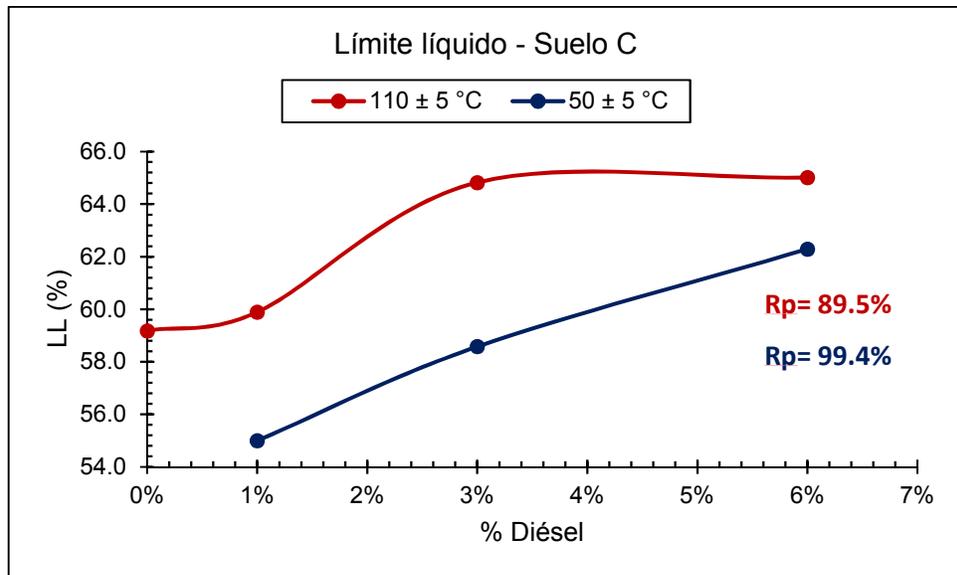


Figura 58. Límite líquido del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 89.5% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva fuerte del 99.4% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Así mismo, se debe resaltar que para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se presenta una tendencia creciente del límite líquido en donde se estabiliza para los tratamientos del 3% y 6% de diésel; ahora, en el caso de la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se presenta el aumento en el valor de la propiedad para todos los tratamientos de diésel utilizados, de ahí que se haya obtenido una correlación casi perfecta entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a esta temperatura de ensayo.

No obstante, esto refleja la incertidumbre en el cambio del límite líquido para este suelo dependiendo del porcentaje de diésel en su estructura y la temperatura de ensayo, donde la tendencia es aumentar el valor de esta propiedad.

Resultados donde se presenta incremento en el límite líquido del suelo estudiado con el incremento en el porcentaje de diésel fue reportado por Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad pasando de 48% a 56%, Zárate (2014) para una arcilla de alta plasticidad pasando de 63.33% a 76% y por Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML pasando de 27.05% a 36.78%.

Zárate (2014) recopiló información en donde se reportan casos en que el límite líquido aumenta, esto se justifica por una cohesión adicional que proporcionan los hidrocarburos a las partículas de arcilla, donde se requiere de una mayor cantidad de agua durante el ensayo para cambiar la consistencia del suelo.

Esto fue evidenciado durante la realización de los ensayos de laboratorio, en la medida que se aumentaba la cantidad de diésel en el suelo se requería de más agua y mezclado para lograr que la muestra cambiara de consistencia. Se observó la disociación del diésel con las partículas de arcilla a través de una película brillante y de apariencia grasosa debido a que el agua desplazo al diésel de la estructura del suelo, por tanto, el hidrocarburo no disminuyó el espesor de la doble capa difusa de la arcilla manteniendo su capacidad de intercambio de cationes con la adición de diésel para lograr el cambio en el estado de consistencia.

6.4.4.2 Límite plástico.

El límite plástico del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 29.7% para la muestra control a 31.1% para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 4.71%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 30.0% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 30.9% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, representando una variación experimental del 3.00%. El aumento en el límite se explica puesto que el diésel al adherirse a

las partículas de suelo hace que se requiera más agua para cambiar la consistencia del suelo.

Se observa en la Figura 59 que para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C en el tratamiento del 1% de diésel se presenta un descenso del valor de la propiedad representado en un 3.6% respecto a la muestra control; para los tratamientos restantes el valor de la propiedad incrementa.

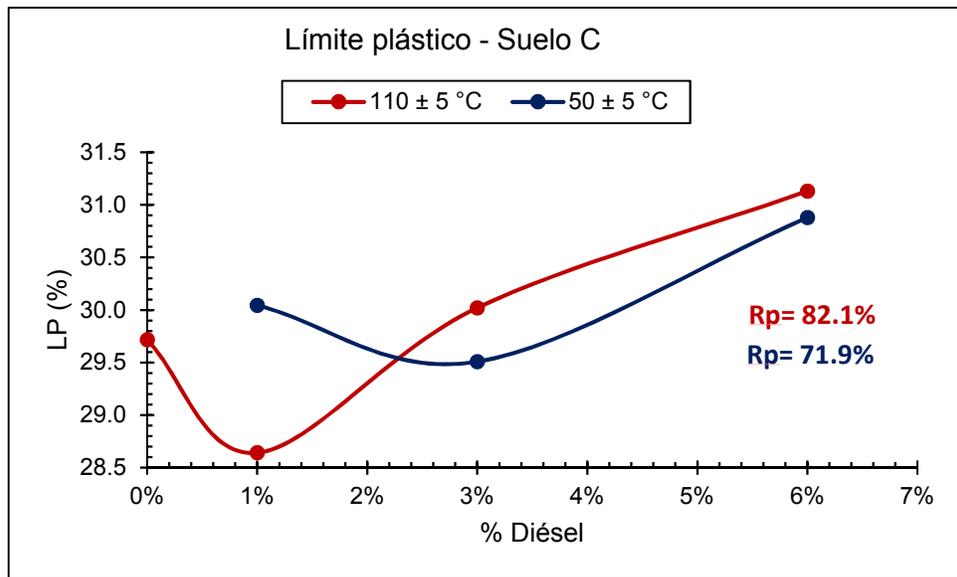


Figura 59. Límite plástico del suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

En el caso de la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se observa para el tratamiento del 1% de diésel un incremento en el valor de la propiedad del 4.90% con respecto al valor obtenido a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, para el tratamiento del 3% de diésel disminuye el valor de la propiedad en 1.67% y luego incrementa en un 3.0% respecto a la muestra con tratamiento del 1% de diésel. De acuerdo con los resultados obtenidos a las dos temperaturas de ensayo utilizadas, se evidencia que el cambio del límite plástico para este suelo no es representativa, así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 0.79%.

Durante la realización del ensayo el moldeamiento del suelo en rollos fue complejo con el incremento del contenido de diésel, tomándose más tiempo para obtener el límite plástico, esto debido a que el hidrocarburo tomó más tiempo en ser expulsado de la estructura del suelo. En adición, el tratamiento del 1% de diésel en la muestra ensayada genera una transición en el comportamiento de la propiedad.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 82.1% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva fuerte del 71.9% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Este comportamiento de relación positiva entre el límite plástico y el porcentaje de diésel fue reportado por Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad pasando de 23% a 31.5%, Zárate (2014) para una arcilla de alta plasticidad pasando de 25% a 37%, Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML pasando de 20.83% a 32.12%.

6.4.4.3 Límite de contracción.

El límite de contracción del suelo disminuyó con la adición del hidrocarburo como se aprecia en la Figura 60, pasando de 23.9% para la muestra control a 22.3% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a una temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 6.69%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se incrementa el límite de contracción, pues pasa de 19.8% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 26.0% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 31.3%.

Ningún autor ha reportado el comportamiento de incremento en el límite de contracción de acuerdo con el estado del arte realizado, pero Solly et al. (2014) reportaron el comportamiento de disminución en el límite de contracción para una arena limosa tratada con diésel pasando de 21.4% a

20.7%, sin embargo, no hay investigaciones referentes a esta propiedad para suelos arcillosos. La disminución en el límite se atribuye a que el diésel modificó las propiedades superficiales de las partículas del suelo haciendo que se requiriera menos cantidad de agua para generar el cambio de consistencia. Por tanto, la temperatura afecta el comportamiento que tiene el límite de contracción para este suelo, cuya incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 2.96%.

Así mismo, se observa que para los tratamientos del 1% y 3% de diésel independiente de la temperatura de ensayo el valor de la propiedad disminuye respecto a la muestra control, no obstante, para el tratamiento del 6% de diésel el valor de la propiedad aumenta para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C y desciende para la temperatura de 110 ± 5 °C.

Es pertinente mencionar que el límite de contracción depende de la capacidad del suelo para comprimirse y de la presión capilar, se esperaba que este suelo al tener en su estructura diésel, su capacidad para comprimirse disminuyera y las presiones capilares aumentarían. Pero esto solo ocurrió para el tratamiento de 6% de diésel y a una temperatura de 50 ± 5 °C respecto al valor de la propiedad de la muestra control, en los restantes tratamientos a esta temperatura y a 110 ± 5 °C ocurrió lo contrario, el límite de contracción disminuyó respecto a la muestra control, aumentando su capacidad para comprimirse debido a que la interacción del diésel con las partículas del suelo debilitó la interacción entre partículas, donde al ejecutar los ensayos el espesor de la doble capa de agua se reduce generando la reducción en el límite de contracción. Aun así, se evidencia para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C que el valor de la propiedad tiende al incremento a partir del tratamiento del 3% de diésel.

Esto evidencia que la presencia del hidrocarburo en este suelo lo afecta, en donde a mayor hidrocarburo el comportamiento de esta propiedad es muy variante; y la temperatura de ensayo influye en los resultados obtenidos.

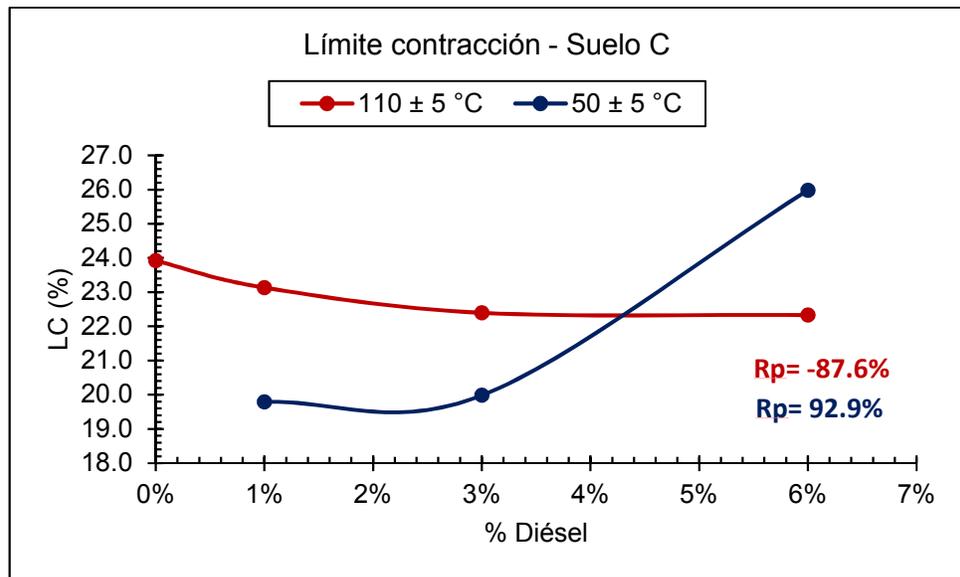


Figura 60. Límite de contracción del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 87.6% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 92.9% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C. Y no existe ningún tipo de asociación entre los resultados de la propiedad para las dos temperaturas de ensayo realizadas, el comportamiento es bastante variado.

6.4.4.4 Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad del suelo se calculó con la ecuación 3.14, en donde se pasó de 29.5% para la muestra control a 33.9% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a una temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 14.9%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 25.0% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 31.4% para la muestra con tratamiento de 6% de diésel, con una variación experimental del 25.6%. Estos resultados indican que, con el incremento del diésel en el suelo, el índice de plasticidad se incrementa.

Según los criterios de plasticidad de la Tabla 16, el suelo mantiene su clasificación de alta plasticidad para el caso de la temperatura de ensayo de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La Figura 61 presenta el cambio en este índice para las temperaturas de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

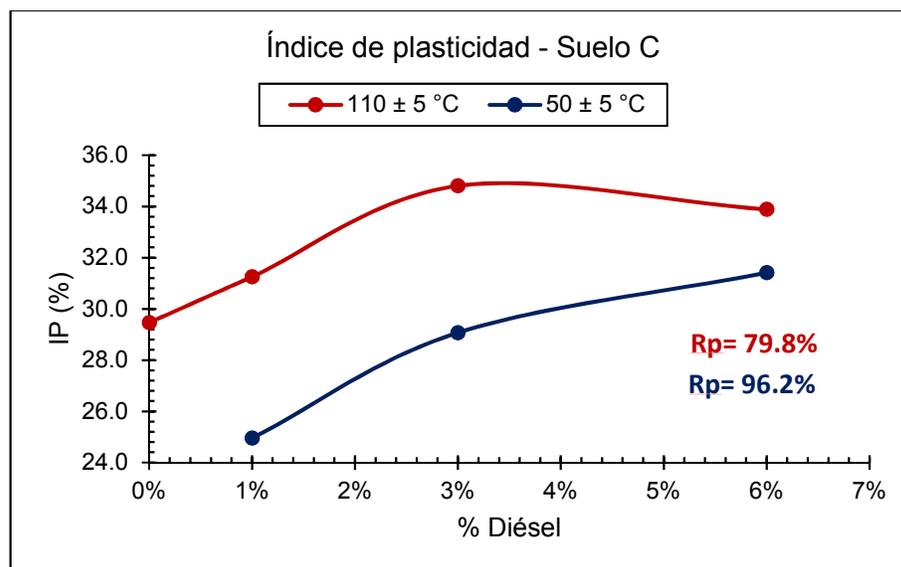


Figura 61. Índice de plasticidad del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva fuerte del 79.8% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; y existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 96.2% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En el caso de la temperatura de ensayo de $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se observa el incremento del valor de la propiedad para los tratamientos del 3% y 6% con respecto al tratamiento del 1% de diésel. En el caso de la temperatura de ensayo de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ se observa el incremento del valor de la propiedad para los tratamientos del 1% y 3% de diésel, y para el tratamiento del 6% se observa un descenso. Así mismo, la incertidumbre experimental de la propiedad para las muestras con diésel entre la temperatura de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ es del 14.64%, lo cual evidencia la incertidumbre en esta propiedad índice cuando hay presencia de hidrocarburo en la estructura del suelo.

El comportamiento de incremento en el índice de plasticidad fue reportado por varios autores. Liu et al. (2015) para una caolinita reportaron que el índice de plasticidad pasa de 16% a 18% con el incremento de diésel en la estructura del suelo. Huang y Lu (2014) para una arcilla reportaron que el índice de plasticidad pasa de 22.3% a 23.2% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Zárate (2014) reporta para una arcilla de alta plasticidad que el índice de plasticidad pasa de 38.33% a 39% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Tong et al. (2012) para un *loamclay* reportaron que índice de plasticidad pasa de 17.3% a 18% con el incremento del diésel en la estructura del suelo.

6.4.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La capacidad de intercambio catiónico permite tener una aproximación de la capacidad de adsorción del suelo, esta se calculó con las ecuaciones 3.12 y 3.13 obteniéndose los resultados presentados en la Figura 62 y Figura 63. Es preciso indicar que, la determinación experimental de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es compleja y se realiza de forma indirecta con procedimientos que se cuestionan, debido a que modifican las propiedades del suelo; por ello las correlaciones son una buena alternativa para cuantificar la CIC.

En la Figura 62 y Figura 63 se observa que con el incremento en la adición de diésel en el suelo la capacidad de intercambio catiónico (CIC) aumenta, lo cual es de esperar por estar en función del límite líquido. Con base en estos resultados y la clasificación del potencial de expansión según la CIC (Tabla 14), se concluye que el suelo según la expresión de Farrar y Coleman es de muy baja expansión para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C y de 50 ± 5 °C, por tanto, independiente de la temperatura de ensayo el suelo mantiene la misma característica de expansión.

Ahora bien, con la expresión de Smith et al., la clasificación de expansión de este suelo cambia respecto a los resultados de utilizar la expresión de Farrar y Coleman, puesto que independiente de la adición de diésel la estructura se clasifica como de

muy alta expansión, en donde los valores de CIC tienden a incrementarse con la adición de diésel.

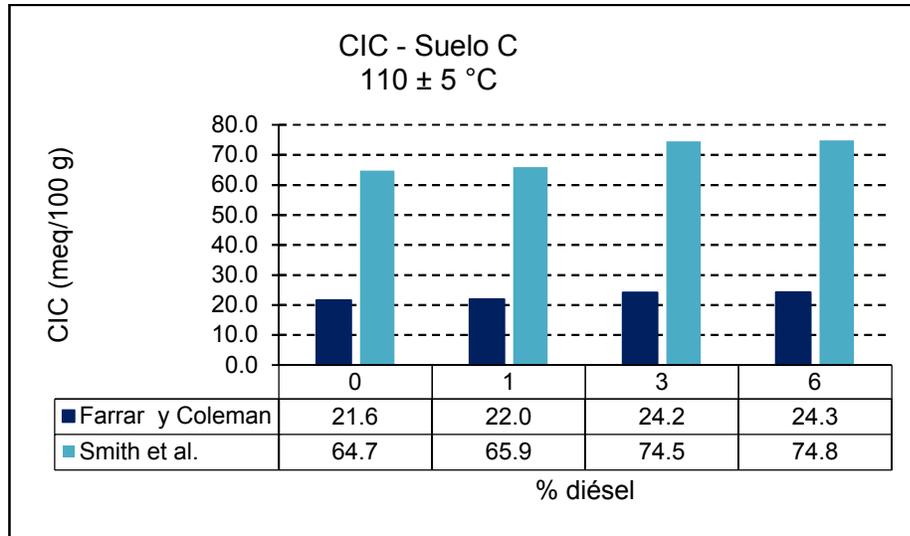


Figura 62. CIC del suelo C con base en los resultados del LL a 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

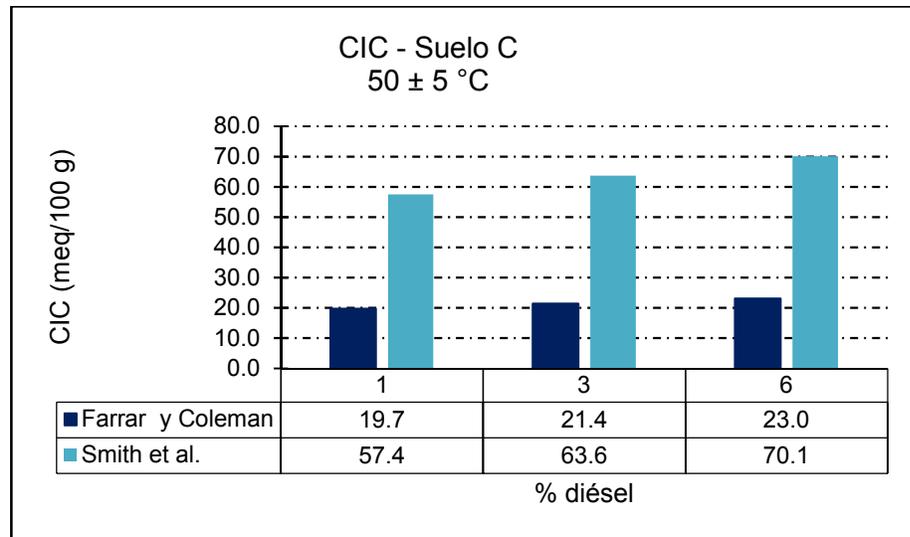


Figura 63. CIC del suelo A con base en los resultados del LL a 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

De acuerdo con los resultados obtenidos se infiere que el incremento en los límites de consistencia del suelo, se relaciona con el incremento en la CIC del suelo por la

presencia del hidrocarburo, donde se requiere de una mayor cantidad de agua para el cambio de consistencia del suelo por la cohesión adicional que ejerce el diésel a las partículas de arcilla.

6.4.6 Clasificación del suelo según SUCS.

Para aplicar el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) se requirió conocer el límite líquido, índice de plasticidad y el tamaño de las partículas, haciendo uso del criterio de la carta de plasticidad de Casagrande, Figura 64. El suelo clasificado como arcilla de alta compresibilidad (CH) exceptuando el tratamiento de 1% de diésel a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C, cuya clasificación corresponde a limo de alta compresibilidad (MH). La comparación entre el índice de plasticidad del suelo y el IP de la línea A se presentan en la Figura 65 y Figura 66 para las temperaturas de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C utilizadas dentro de la investigación.

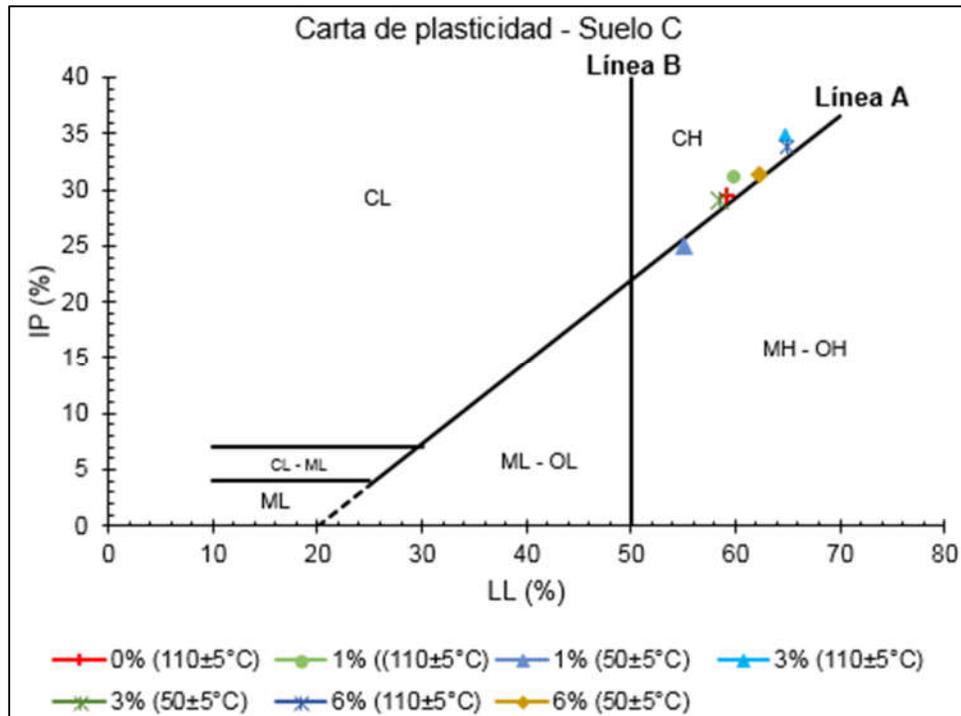


Figura 64. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

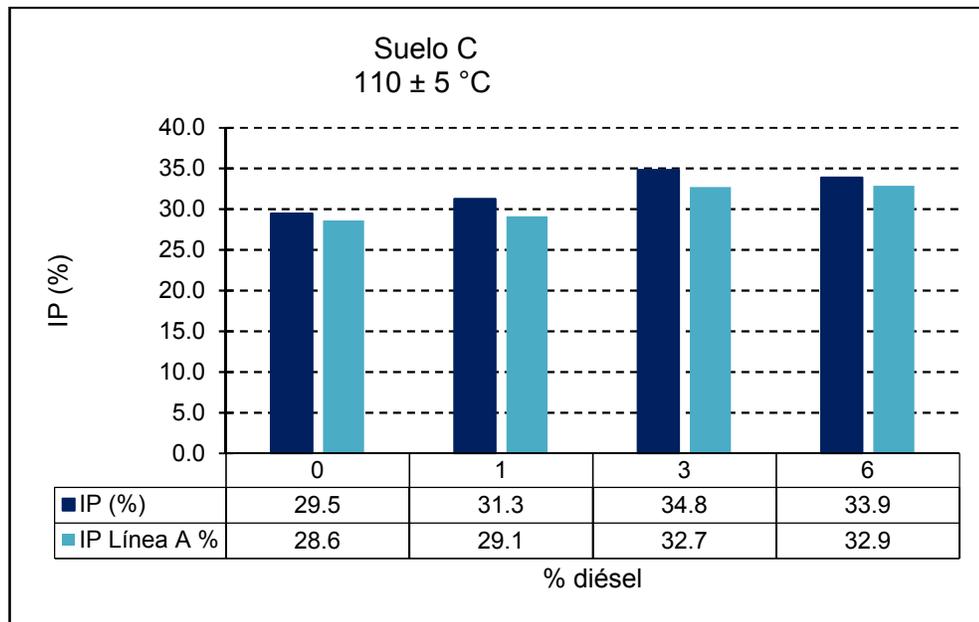


Figura 65. Relación ente el IP del suelo C y el IP de la línea A (110±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

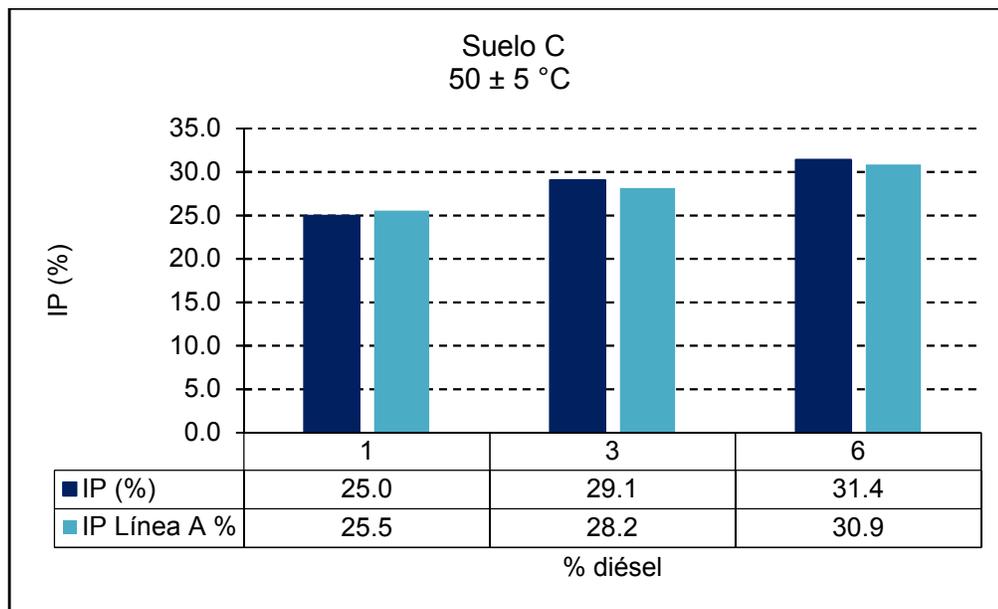


Figura 66. Relación ente el IP del suelo C y el IP de la línea A (50±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

Sí bien se evidencia que la clasificación del suelo no es alterada con la adición del diésel al suelo exceptuando el tratamiento del 1% de diésel a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C, este dato en la Figura 64 se observa muy próximo a la línea A y su variación se atribuye a la variabilidad de los límites con el diésel y la temperatura de ensayo, por tanto, es posible concluir que el hidrocarburo no cambia la clasificación del suelo C con base en los criterios del SUCS.

6.4.7 Resistencia a la compresión confinada.

Las muestras para la realización de este ensayo tenían porcentajes de diésel de 0%, 1%, 3% y 6%. Se definió como parámetro de control la densidad seca de 1.15 g/cm^3 , de acuerdo con la humedad inicial suministrada a las muestras del 30.3%, la densidad total del suelo corresponde a 1.32 g/cm^3 ; para tal fin las probetas se compactaron de acuerdo con el volumen del recipiente de PVC de compactación, 91.13 cm^3 , y la densidad total definida anteriormente.

En la Figura 67 se observa la pérdida de resistencia del suelo en la medida que se incrementa la cantidad de diésel, viéndose reducida la capacidad para deformarse en los tres tratamientos utilizados. Para el tratamiento del 1% se reduce la deformación unitaria en 38.6%, para el tratamiento del 3% de diésel se reduce la deformación unitaria en 43.3% y para el tratamiento del 6% de diésel se reduce la deformación unitaria en 44.8%, todas respecto a la muestra control.

Al trabajar con muestras alteradas la falla que se presenta es frágil. La resistencia pasa de 357.1 KPa a 199.4 KPa para un tratamiento del 6% de diésel, que representa una reducción del 44.2%. Así mismo, se observa que la mayor pérdida de resistencia se presenta para el tratamiento del 6% de diésel.

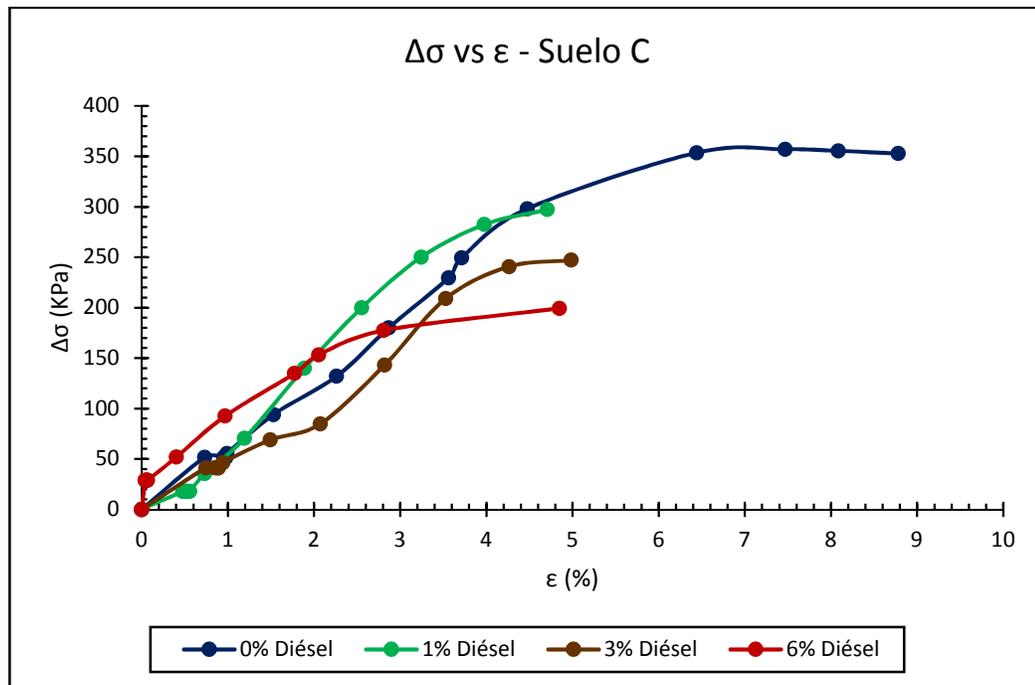


Figura 67. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

Así mismo, se observa que para el tratamiento del 6% de diésel la rigidez del suelo aparentemente aumenta frente a la muestra sin tratamiento y con tratamiento del 1% y 3% de diésel respectivamente hasta una deformación unitaria de 1.8%, para valores mayores de deformación unitaria, el tratamiento del 1% de diésel representa la mayor rigidez hasta su falla en 5.4% de deformación unitaria.

La Figura 68 ilustra los valores de resistencia a la compresión confinada y resistencia al corte del suelo C, se aprecia que estos parámetros de resistencia disminuyen con el incremento en el contenido de diésel en la estructura del suelo. Este comportamiento de disminución de los parámetros de resistencia fue reportado por Walia et al. (2013) y Nasehi et al. (2016).

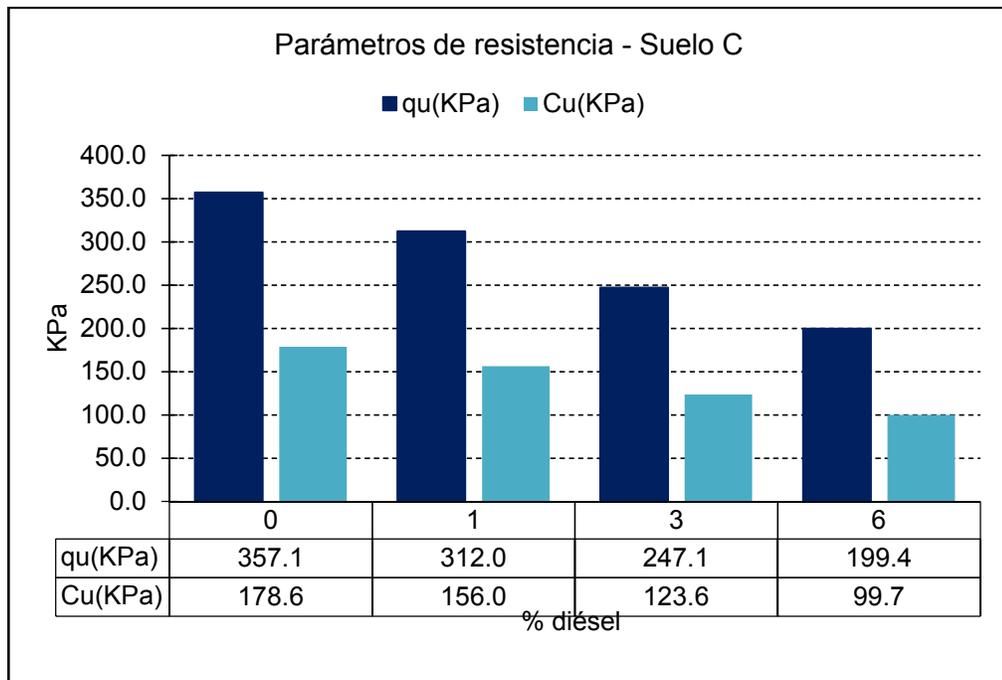


Figura 68. Variación de los parámetros de resistencia del suelo C con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

Este comportamiento se atribuye a que la resistencia al corte del suelo es influenciada por las fuerzas de atracción y repulsión entre sus partículas. Al tener en su estructura diésel, un fluido no polar con baja constante dieléctrica se afecta la doble capa difusa del suelo (Zárate, 2014). El espesor de la doble capa difusa es función de la constante dieléctrica de los fluidos de poros del suelo, por tanto, al tener en los poros agua y diésel se reduce la constante dieléctrica, lo que implica que disminuye la capacidad de los fluidos de separar iones de cargas opuestas y se incrementan las fuerzas de atracción, llevando a una reducción de la resistencia a la compresión inconfiada y la resistencia al corte.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 97.6% entre los parámetros de resistencia (resistencia a la compresión no confinada y la resistencia al corte) y el porcentaje de diésel. Por lo cual, el suelo C sometido al proceso de impregnación de diésel perdió resistencia en la medida que se incrementó la cantidad de diésel en su estructura.

6.4.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.

Las relaciones gravimétricas y volumétricas se obtuvieron con base en los diagramas de fase presentados en el Anexo 28, los cuales se desarrollaron a partir de los datos del ensayo de compresión inconfiada, en el cual se calculó la densidad total del suelo y su humedad. Adicional, el valor de la gravedad específica de los sólidos se determinó en laboratorio y sus resultados fueron presentados en el numeral 6.2.3. Con estas tres (3) variables conocidas se desarrolló el diagrama de fase para cada porcentaje de hidrocarburo impregnado al suelo y para cada una de las temperaturas de ensayo, donde la cantidad de hidrocarburo se estimó como porcentaje del peso seco del suelo, y la cantidad de agua presente en el suelo como la diferencia entre la masa total y la masa de sólidos más diésel; se realizó de esta forma la estimación para tener como variable de control el peso unitario total del suelo y evidenciar los cambios en su estructura con el incremento del hidrocarburo. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 35.

Tabla 35. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo C.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110±5°C	110±5°C	50±5°C	110±5°C	50±5°C	110±5°C	50±5°C
γ_t (KN/m ³)	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
γ_d (KN/m ³)	13.0	13.0	13.3	12.8	13.2	12.8	13.2
e	1.03	1.00	0.87	0.95	0.78	0.61	0.77
η (%)	50.8	49.9	4.6	48.7	43.7	37.8	43.6
S (%)	78.9	81.1	79.4	85.6	87.2	100.0	87.9
ω (%)	30.3	30.7	27.1	31.9	28.4	32.4	28.6

Fuente: Elaboración de la autora.

La relación de vacíos de este suelo C (CH) disminuye en la medida que se incrementa el contenido de diésel en su estructura, debido a que se presenta un aparente aumento del volumen de los sólidos por el aumento de las fuerzas de atracción, originando que las partículas sólidas del suelo se acerquen entre ellas y generen una cohesión aparente. Esto indica que el diésel fomenta la capacidad del

agua para formar estructuras floculadas con las partículas del suelo, tal como lo evidencia Nasehi et al. (2016).

La porosidad al ser función de la relación de vacíos también disminuye con el incremento de diésel en la estructura del suelo. Al igual que en las otras propiedades geotécnicas, la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C produce cambios más notorios frente a la temperatura de 50 ± 5 °C.

El grado de saturación del suelo es función de los vacíos en su estructura, por tanto, el diésel empieza a ocupar los espacios de poros del suelo a tal punto que con un contenido de 6% de diésel, representado en peso seco del suelo, se alcanza la saturación del suelo para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Esta es una condición extrema que pone en evidencia la pérdida de resistencia del suelo y la formación aparente de estructuras floculadas.

No obstante, al ser estos parámetros determinados a partir de los datos de laboratorio de contenido de humedad y gravedad específica de los sólidos del suelo C (CH), se evidencia una incertidumbre experimental del 9.69%, la cual es aceptable dentro de la validez de los resultados de la relación de vacíos, porosidad y grado de saturación de las unidades experimentales de este suelo, teniendo en cuenta el número de unidades experimentales para este suelo dentro de la investigación.

6.4.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.

Los análisis de asociación fueron realizados con el software de análisis estadístico SPSS de IBM, usando asociaciones por distancias entre variables y considerando como medida de similitud la correlación de Pearson.

Para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se encontró una asociación lineal negativa muy fuerte del 83.7% entre la gravedad específica de los sólidos y el límite plástico; una asociación lineal negativa muy fuerte del 93.4% entre el límite líquido y el límite de contracción; una asociación lineal positiva muy fuerte del 96.0% entre

el límite líquido y el índice de plasticidad; y una asociación negativa muy fuerte del 96.8% entre el límite de contracción y el índice de plasticidad.

Respecto a la temperatura de 50 ± 5 °C se encontró una asociación lineal negativa muy fuerte entre la gravedad específica de los sólidos y, el límite líquido e índice de plasticidad del 89.1% y 95.4% respectivamente; una asociación positiva muy fuerte entre el límite líquido, y el límite de contracción e índice de plasticidad del 88.4% y 98.6% respectivamente; y una asociación positiva muy fuerte entre el límite plástico y el límite de contracción del 92.5%.

Así mismo, la reducción en la relación de vacíos y la porosidad se asocia a la capacidad del diésel para fomentar que el agua forme estructuras floculadas con las partículas de suelo. Y la saturación aumento en la medida que se incrementó el hidrocarburo porque ocupo los espacios vacíos del suelo.

Los valores obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se incrementan con el aumento en el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo por estar en función del límite líquido, es decir, se obtuvieron de correlaciones que tienen sus propias incertidumbres. Es preciso indicar que, medir en el laboratorio la CIC es bastante complejo y sus procedimientos pueden afectar las propiedades del suelo, puesto que se requiere un método que pueda medir la capacidad de los suelos de adsorber cationes de una solución acuosa con el mismo pH, fuerza iónica, constante dieléctrica y composición, sumado a los componentes químicos de la solución acuosa (por ejemplo, acetato de amonio y acetato de sodio) que pueden interactuar con los suelos finos y modificar sus propiedades, por tanto, no se obtendrían los valores reales de CIC; de ahí que, al emplear las correlaciones se obtuvieron unos estimativos para evidenciar el comportamiento que presentaba el suelo a nivel de interacción química (modificación de su capacidad para retener cationes de cambio) con la presencia del diésel y su influencia en el comportamiento de expansión.

La clasificación del suelo es función de los límites líquido y plástico, donde se encuentran cuatro tipos de suelos. Este suelo C clasificó como arcilla de alta compresibilidad (CH) y no se vio alterada su clasificación con la adición del diésel en las diferentes unidades experimentales exceptuando el tratamiento del 1% de

diésel a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C que clasifico como MH. Es preciso señalar que, al ser variable el comportamiento de los límites producto de la interacción del suelo con el diésel, su plasticidad puede variar y se podría presentar un cambio en la clasificación para los valores más cercanos a las fronteras que se encuentran en la carta de plasticidad, como fue el caso del tratamiento del 1% de diésel a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Así mismo, este suelo tiene un índice de plasticidad que es muy cercano al índice de plasticidad de la línea A, por lo cual porcentajes mayores del 6% de hidrocarburo presente en el suelo podrían presentar cambios más notorios en la clasificación de este suelo.

6.5. Suelo Tipo E

Este suelo corresponde a una arcilla de baja plasticidad, se desconoce su lugar de procedencia, con 1.1% de materia orgánica, Tabla 36. En la ejecución del proceso experimental se realizó el proceso de secado al aire de las muestras, de tal forma que no se afectará su composición química ni sus propiedades; luego se procedió a triturar las muestras y adicionarle agua para alcanzar un contenido de humedad del 9.0%. Con esto se garantizó que las muestras tuvieran una consistencia que facilitará la impregnación del diésel, y se analizará la interacción del agua presente en los poros del suelo con el hidrocarburo. Todos los detalles de los resultados de laboratorio se presentan en el Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 9.

Tabla 36. Resultados del ensayo de ignición al suelo E, sin presencia de diésel, según la norma INV 121 E -13

A: masa crisol + suelo seco antes de la ignición	40.62	g
B: masa crisol + suelo seco después de la ignición	40.24	g
C: masa crisol	6.68	g
% materia orgánica	1.1	%

Fuente: Elaboración de la autora.

6.5.1 Composición mineralógica.

La composición mineralógica de este suelo se determinó por medio de un análisis mineralógico de muestra total (polvo) por difracción de rayos X (DRX), cuyos resultados se presentan en el Anexo 24 y Anexo 25. Se evidencia que la muestra control tenía como mineral dominante el cuarzo (>50%), presencia de caolinita (5-15%), trazas de feldespato (<5%), presencia de micas (5-15%) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5%) que para su diferenciación se requiere procesar la muestra con otros tratamientos como etilenglicol y calentamiento a 550°C.

La muestra con 6% de diésel fue analizada para comprobar si el diésel provoca cambios. Los resultados indican que el mineral predominante es el cuarzo (>50%), presencia de caolinita (5-15%), trazas de feldespato (<5%), trazas de micas (<5%) y arcillas 14 Å, donde se encuentran esmectita, vermiculita y clorita (<5%). No obstante, los resultados demuestran la disminución en la presencia de las micas respecto a la muestra control y una atenuación de las arcillas 14 Å. Así mismo, se presenta una acentuación de la caolinita y los feldespatos.

Si bien la muestra control y la muestra con tratamiento de 6% de diésel mantienen el mismo comportamiento en los difractogramas, se presenta una reducción en el porcentaje de micas; aun así, el diésel no alcanza a afectar la estructura mineralógica de este suelo teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue corto para producir cambios en la composición química de los minerales.

Esto también fue reportado por Echeverri et al. (2015); sumado a que la muestra tenía como mineral dominante el cuarzo, un mineral de origen detrítico muy resistente a los procesos de erosión y a las alteraciones por reacciones químicas, donde posiblemente se requiera de muchos años para que el hidrocarburo produzca cambios.

Es importante señalar que el tiempo de exposición al hidrocarburo fue de una semana, pero en casos reales el hidrocarburo puede estar presente por periodos prolongados de meses e incluso años, cuando no se reportan los incidentes. Razón por la cual, investigaciones futuras podrían estudiar si la disminución en las micas y las atenuaciones de los otros minerales constituyentes del suelo con tiempos más prolongados de exposición podrían llegar a cambiar su estructura mineralógica.

6.5.2 Contenido de humedad.

El contenido de humedad de esta muestra se definió teóricamente en 9.0% para garantizar condiciones de manejabilidad y un contenido de agua idóneo para ser expuesto al hidrocarburo; el agua adicionada se calculó respecto al peso seco de la muestra, se permitió la homogenización y equilibrio entre las partículas del suelo y el agua, posteriormente se adicionó el 1%, 3% y 6% de diésel respecto al peso seco de la muestra.

Así mismo, el contenido de humedad definido teóricamente fue 9.0% y el obtenido en el laboratorio fue 9.5% para la muestra control, lo cual representa una variación experimental del 5.55%, la cual es aceptable para los propósitos de la investigación.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se muestran en la Figura 69, los cuales se desarrollaron a temperaturas de 50 ± 5 °C y 110 ± 5 °C; para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se evidencia la tendencia al incremento en el contenido de humedad con la adición del hidrocarburo; y para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se observa la disminución del valor de la propiedad respecto a la muestra de control, pero se observa su tendencia creciente en la medida que se incrementa el hidrocarburo en la estructura del suelo.

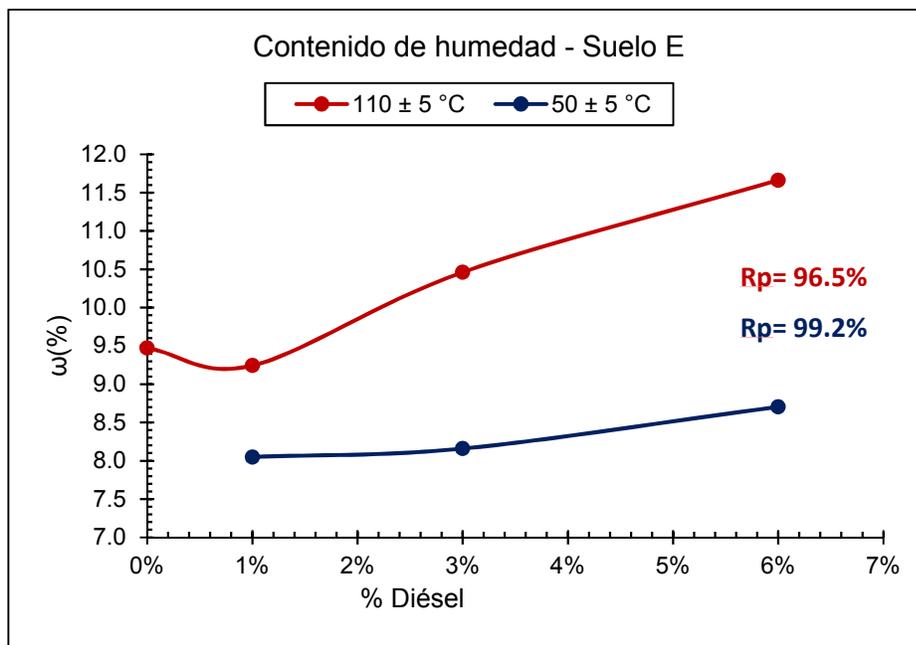


Figura 69. Contenido de humedad del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Si bien el valor de la propiedad varía, se estableció una asociación lineal positiva muy fuerte del 96.5% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad a 110 ± 5 °C y una asociación lineal positiva muy fuerte del 99.2% entre el porcentaje de diésel y el contenido de humedad a 50 ± 5 °C.

Por su parte, la temperatura del ensayo influyó en los resultados, para el caso de la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se observó que el contenido de humedad disminuye para el tratamiento del 1% de diésel y luego empieza a incrementarse para los tratamientos del 3% y 6% de diésel. Ahora, cuando se realizaron los ensayos a una temperatura de 50 ± 5 °C se observó que el valor de la propiedad a partir del tratamiento del 1% de diésel presenta un ligero aumento para los tratamientos del 3% y 6% de diésel, pero sus valores son menores a los obtenidos con la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Esta incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 20.1%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación teniendo en cuenta la cantidad de unidades experimentales.

Es importante señalar que se mantiene la tendencia que, entre mayor temperatura de ensayo, mayor es el valor del contenido de humedad; posiblemente porque se tiene una mayor tasa de evaporación de los líquidos presentes en la estructura del suelo.

De acuerdo con la revisión de la literatura presentada en el capítulo I, no se encontraron reportes de estudios que evidencien la tendencia a incrementar el contenido de humedad con la adición del diésel, sumado a la falta de investigación en esta propiedad.

No obstante, el diésel tiene su punto de ebullición a $151^{\circ}\text{C} - 371^{\circ}\text{C}$, lo que representa que las temperaturas manejadas en los ensayos no producen su calcinación, su efecto en el contenido de humedad del suelo se evidenció junto a la complejidad en la determinación de esta propiedad por la composición particular de las muestras, sumado a que el hidrocarburo presenta pérdidas por evaporación durante el secado y otra parte queda remanente en estado sólido, lo cual las normas no tienen en consideración.

6.5.3 Gravedad específica de los sólidos.

La gravedad específica de los sólidos se determinó en el laboratorio usando un picnómetro de 500 mL, los resultados para las temperaturas de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ y 60°C se encuentran en la Figura 70. Se observa que la gravedad específica de los sólidos de esta arcilla era 2.71 para la muestra control y con la adición del 6% diésel a su estructura disminuyó a 2.60 para la temperatura de ensayo de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$, lo cual representa una disminución del 4.06%. Para la temperatura de ensayo de 60°C pasa de 2.70 para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 2.62 para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 2.96%.

La temperatura de ensayo afectó ligeramente los resultados obtenidos, evidenciando que a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ es mayor la reducción de esta propiedad. No obstante, al impregnar las muestras con el tratamiento del 3% de diésel se presenta un mayor

valor de esta propiedad para la temperatura de 60 °C con respecto a los 110±5 °C, esto se atribuye a la volatilidad del hidrocarburo con la temperatura. Esta incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110±5 °C y 60 °C es del 0.93%, la cual es aceptable para los resultados de la investigación.

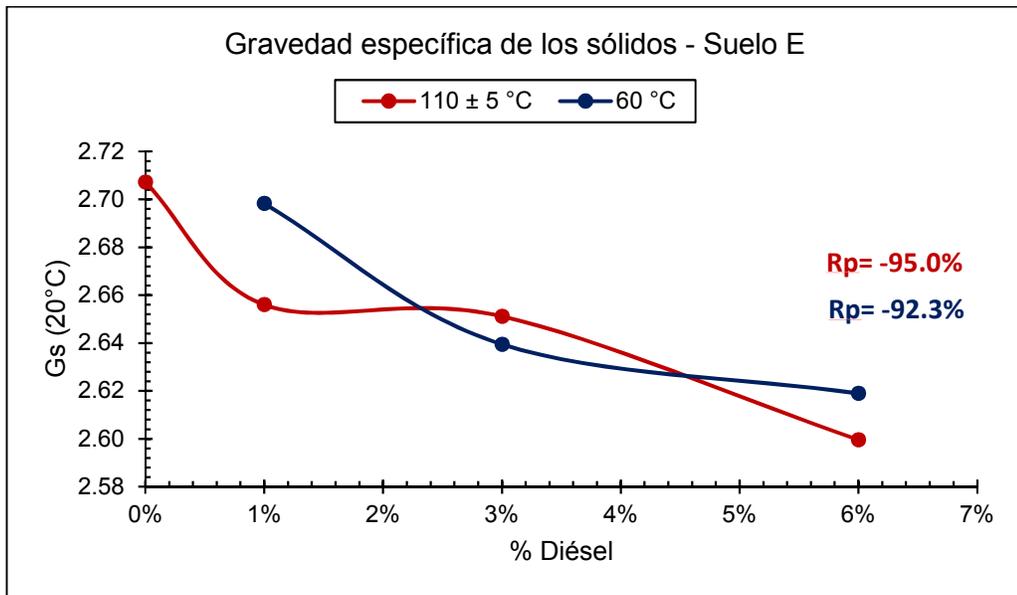


Figura 70. Gravedad específica de los sólidos del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Estos resultados ponen en evidencia lo reportado por Walia et al. (2013), donde la gravedad específica disminuyó gradualmente con la adición del diésel. Hay que mencionar que, al realizar el ensayo con agua se esperó un leve aumento de la gravedad específica, debido a que las partículas de arcilla estaban parcialmente hidratadas, sin embargo, la adsorción del diésel a las partículas del suelo produjo que no se presentará interacción con el agua y por el contrario disminuyó la fracción sólida, obteniéndose una tendencia descendente en esta propiedad con el incremento en el diésel utilizado.

Adicional, se evidenció que existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 95.0% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de diésel a una temperatura de ensayo de 110±5 °C; y se tiene una asociación lineal negativa muy

fuerte del 92.3% entre la gravedad específica de los sólidos y el porcentaje de diésel a una temperatura de ensayo de 60 °C. Por tanto, en la medida que aumenta el porcentaje de diésel en el suelo la gravedad específica de los sólidos disminuye.

6.5.4 Límites de Atterberg.

Los límites de consistencia del suelo son función del contenido de humedad, en donde el diésel modificó sustancialmente sus valores, los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. LL, LP, LC e IP del suelo E.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110±5°C	110±5°C	50±5°C	110±5°C	50±5°C	110±5°C	50±5°C
LL (%)	24.4	24.1	24.2	26.3	23.8	28.1	25.5
LP (%)	13.5	13.9	13.4	14.6	13.6	15.3	13.7
LC (%)	9.0	11.6	11.1	13.6	10.0	14.7	10.5
IP (%)	11.0	10.2	10.7	11.7	10.2	12.8	11.8

Fuente: Elaboración de la autora.

6.5.4.1 Límite líquido.

El límite líquido del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 24.4% para la muestra control a 28.1% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110±5 °C, lo cual representa una variación experimental del 15.2%. Para la temperatura de ensayo de 50±5 °C pasa de 24.2% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 25.5% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5.37%.

Se observa en la Figura 71 que el incremento del límite líquido a la temperatura de ensayo de 110±5 °C es más notorio frente a la temperatura

de ensayo de 50 ± 5 °C, por tanto, la temperatura es un factor clave para determinar la magnitud de los cambios en las propiedades del suelo; por esto los reportes de los incidentes con diésel en el suelo deben ser reportados para que la caracterización del suelo sea adecuada. La incertidumbre experimental en la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 6.11%.

Respecto a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se observa un descenso en el valor de la propiedad para el tratamiento del 1% de diésel del 1.23% respecto de la muestra control, luego se presenta una tendencia creciente para los tratamientos del 3% y 6% de diésel. Ahora bien, para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se observa el descenso del valor de la propiedad del tratamiento del 3% de diésel respecto al tratamiento del 1% de diésel, en el caso del tratamiento del 6% de diésel se observa el ascenso en el valor de la propiedad respecto al tratamientos del 1% de diésel.

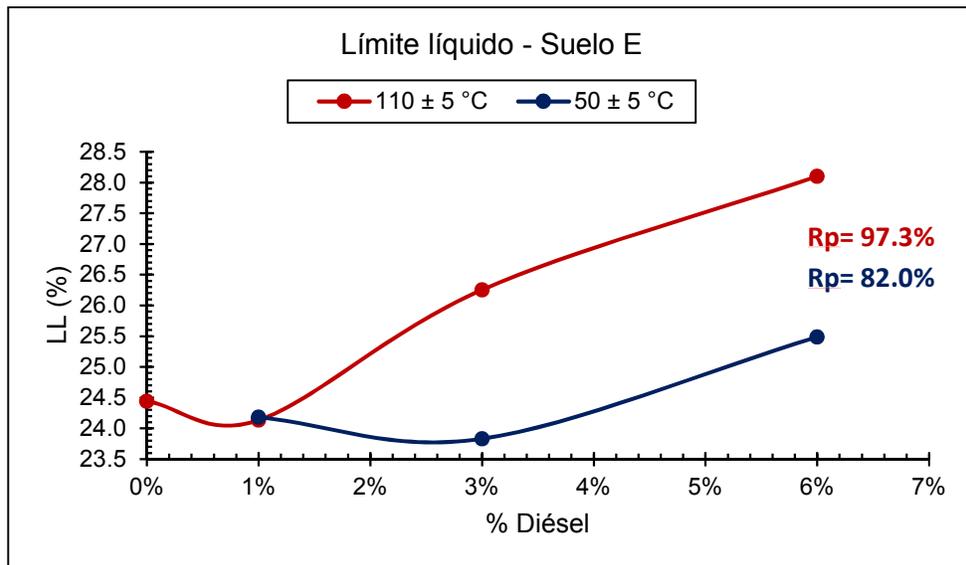


Figura 71. Límite líquido del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 97.3% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 82.0% entre el límite líquido y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Según Montoro (2011), el límite líquido en los suelos con contenido de fluidos orgánicos debe disminuir por el aumento en las fuerzas de atracción resultantes entre las partículas, pero esto solo ocurrió para el tratamiento del 1% de diésel a ambas temperaturas de ensayo y para el tratamiento del 3% de diésel para una temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C; para el restante de tratamientos y temperaturas de ensayo se aumentó el valor de esta propiedad respecto a la muestra control.

Zárate (2014) recopiló información en donde se reportan casos en que el límite líquido aumenta, esto se justifica por una cohesión adicional que proporcionan los hidrocarburos a las partículas de arcilla, donde se requiere de una mayor cantidad de agua durante el ensayo para cambiar la consistencia del suelo.

Esto fue evidenciado durante la realización de los ensayos de laboratorio, en la medida que se aumentaba la cantidad de diésel en el suelo se requería de más agua y mezclado para lograr que la muestra cambie de consistencia, se observó la disociación del diésel con las partículas de arcilla a través de una película brillante y de apariencia grasosa debido a que el agua desplaza al diésel de la estructura del suelo, por tanto, el hidrocarburo no disminuyó el espesor de la doble capa difusa de la arcilla manteniendo su capacidad de intercambio de cationes e incrementándola con la adición de diésel para lograr el cambio en el estado de consistencia.

Resultados donde se presenta incremento en el límite líquido del suelo estudiado con el incremento en el porcentaje de diésel fue reportado por Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad pasando de 48% a 56%, Zárate (2014) para una arcilla de alta plasticidad pasando de 63.33% a 76% y por Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML pasando de 27.05% a 36.78%.

6.5.4.2 Límite plástico.

El límite plástico del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, pasando de 13.5% para la muestra control a 15.3% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 13.3%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 13.4% para la muestra con tratamiento del 1% a 13.7% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 2.24%. Se observa en la Figura 72 que para la temperatura de 110 ± 5 °C el incremento es ascendente y notorio, sin embargo, para la temperatura de 50 ± 5 °C el incremento no es notorio. La incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 6.92%. El aumento en el límite se explica puesto que el diésel al adherirse a las partículas de suelo hace que se requiera más agua para cambiar la consistencia del suelo. Durante la realización del ensayo el moldeamiento del suelo en rollos se dificultó con el incremento del contenido de diésel, tomándose más tiempo para obtener el límite plástico, esto debido a que el hidrocarburo tomó más tiempo en ser expulsado de la estructura del suelo.

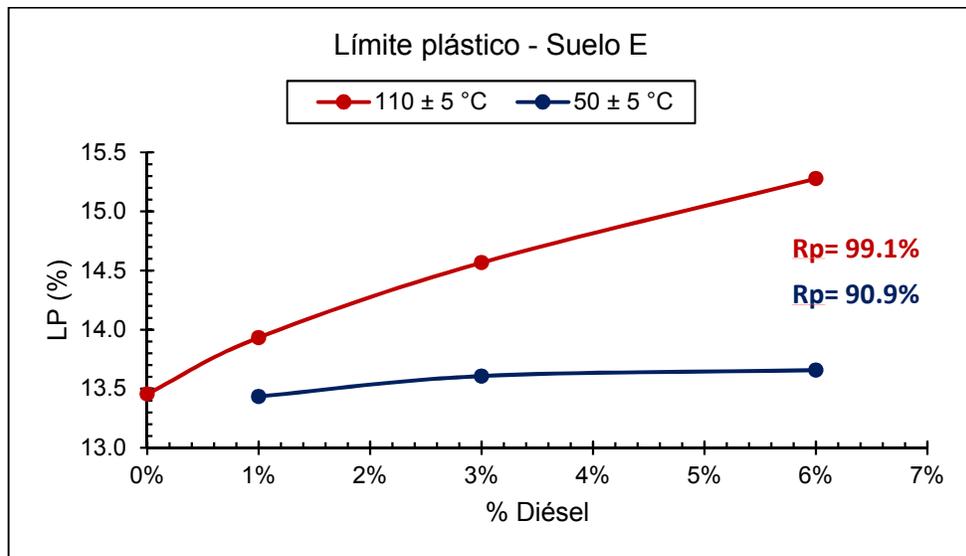


Figura 72. Límite plástico del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva perfecta del 99.1% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 90.9% entre el límite plástico y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

Este comportamiento de relación positiva entre el límite plástico y el porcentaje de diésel fue reportado por Nasehi et al. (2016) para una arcilla de baja plasticidad pasando de 23% a 31.5%, Zárate (2014) para una arcilla de alta plasticidad pasando de 25% a 37%, Walia et al. (2013) para un suelo CL-ML pasando de 20.83% a 32.12%.

6.5.4.3 Límite de contracción.

El límite de contracción del suelo se incrementó con la adición del hidrocarburo, Figura 73, pasando de 9.0% para la muestra control a 14.7% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 63.3%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C disminuye el valor de la propiedad, al pasar de 11.1% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 10.5% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 5.4%. Por lo tanto, en este suelo de baja plasticidad la temperatura de ensayo modifica notablemente los valores del límite de contracción, cuya incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 19.71%.

Ningún autor ha reportado el comportamiento de incremento en el límite de contracción de acuerdo con el estado del arte realizado, sumado a que no hay investigaciones referentes a esta propiedad para suelos arcillosos. El aumento en el límite se explica puesto que el diésel al adherirse a las partículas de suelo hace que se requiera más agua para cambiar la consistencia del suelo.

Hay que mencionar que, el límite de contracción depende de la capacidad del suelo para comprimirse y de la presión capilar, de acuerdo con los resultados presentados se espera que este suelo de baja plasticidad al tener en su estructura diésel, su capacidad para comprimirse disminuya y las presiones capilares aumenten, lo cual ocurriría para el tratamiento del 1% y 3% de diésel a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C con respecto a la muestra control.

En la Figura 73 se observa el incremento en el valor del límite de contracción con el aumento de la cantidad de diésel en el suelo para la temperatura de ensayo del 110 ± 5 °C. No obstante, para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se presenta un descenso en el valor de la propiedad para el tratamiento de 3% de diésel respecto al tratamiento del 1% de diésel, pero en el tratamiento del 6% de diésel el valor de la propiedad se incrementa respecto al tratamiento del 3% de diésel. Así mismo, el valor de la propiedad es mayor a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C respecto a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C.

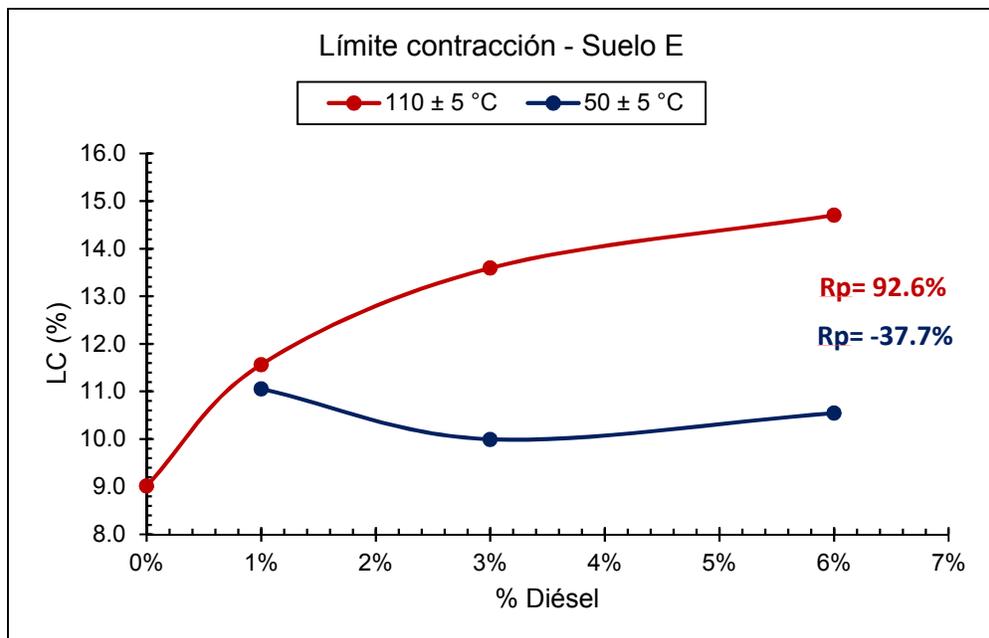


Figura 73. Límite de contracción del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 92.6% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal negativa débil del 37.7% entre el límite de contracción y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

6.5.4.4 Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad del suelo se calculó con la ecuación 3.14, en donde se pasó de 11% para la muestra control a 12.8% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, lo cual representa una variación experimental del 16.4%. Para la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C pasa de 10.7% para la muestra con tratamiento del 1% de diésel a 11.8% para la muestra con tratamiento del 6% de diésel, lo cual representa una variación experimental del 10.28%.

Estos resultados indican que, con el incremento del diésel en el suelo el índice de plasticidad se incrementa. Sin embargo, la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C presenta mayores valores de la propiedad respecto a la temperatura de 50 ± 5 °C, cuya incertidumbre experimental de la propiedad de las muestras con diésel entre la temperatura de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C es del 4.98%.

Según los criterios de plasticidad de la Tabla 16, el suelo sin diésel tiene una baja plasticidad y con los tratamientos de diésel pasa a comportarse como un suelo de media plasticidad para ambas temperaturas de ensayo. La Figura 74 presenta el cambio en este índice para las temperaturas de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C.

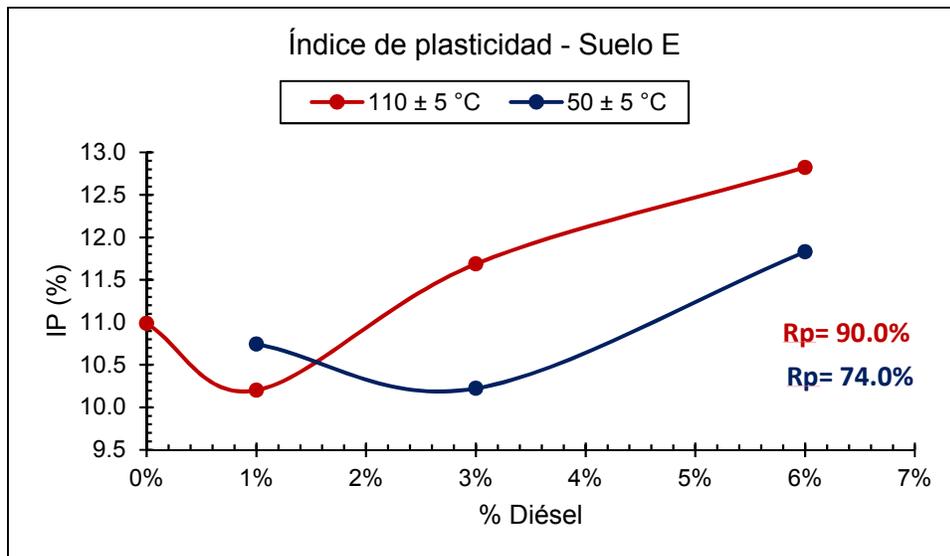


Figura 74. Índice de plasticidad del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Analizando los datos existe una asociación lineal positiva muy fuerte del 90.0% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a 110 ± 5 °C; y existe una asociación lineal positiva moderada del 74.0% entre el índice de plasticidad y el porcentaje de diésel a 50 ± 5 °C.

El comportamiento de incremento en el índice de plasticidad fue reportado por varios autores. Liu et al. (2015) para una caolinita reportaron que el índice de plasticidad pasa de 16% a 18% con el incremento de diésel en la estructura del suelo. Huang y Lu (2014) para una arcilla reportaron que el índice de plasticidad pasa de 22.3% a 23.2% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Zárate (2014) reporta para una arcilla de alta plasticidad que el índice de plasticidad pasa de 38.33% a 39% con el incremento del diésel en la estructura del suelo. Tong et al. (2012) para un *loamclay* reportaron que índice de plasticidad pasa de 17.3% a 18% con el incremento del diésel en la estructura del suelo.

6.5.5 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La capacidad de intercambio catiónico permite tener una aproximación de la capacidad de adsorción del suelo, esta se calculó con las ecuaciones 3.12 y 3.13 obteniéndose los resultados presentados en la Figura 75 y Figura 76. Es preciso indicar que, la determinación experimental de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es compleja y se realiza de forma indirecta con procedimientos que se cuestionan, debido a que modifican las propiedades del suelo; por ello las correlaciones son una buena alternativa para cuantificar la CIC.

En la Figura 75 y Figura 76 se observa que con el incremento en la adición de diésel en el suelo la capacidad de intercambio catiónico (CIC) aumenta, lo cual es de esperar por estar en función del límite líquido, el cual incrementó. Con base en estos resultados y la clasificación del potencial de expansión según la CIC (Tabla 14), se concluye que el suelo según la expresión de Farrar y Coleman es de baja expansión para la temperatura de 110 ± 5 °C y de 50 ± 5 °C, por tanto, independiente de la temperatura de ensayo el suelo mantiene la misma característica de expansión.

Ahora bien, con la expresión de Smith et al., la clasificación de expansión de este suelo se mantiene respecto a los resultados de utilizar la expresión de Farrar y Coleman, puesto que independiente de la adición de diésel a la estructura del suelo se clasifica como de baja expansión, en donde los valores de CIC tienden a incrementar con la presencia de diésel.

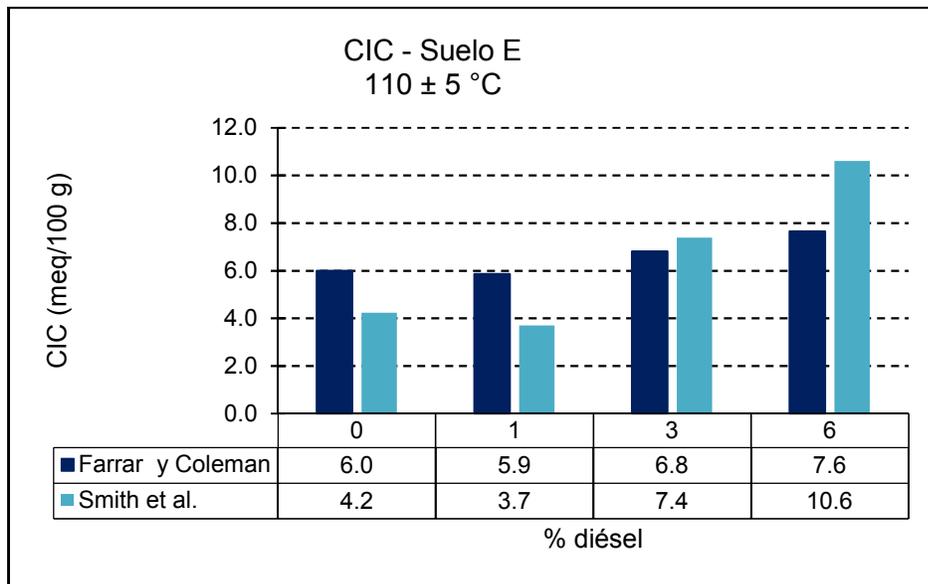


Figura 75. CIC del suelo E con base en los resultados de LL a 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

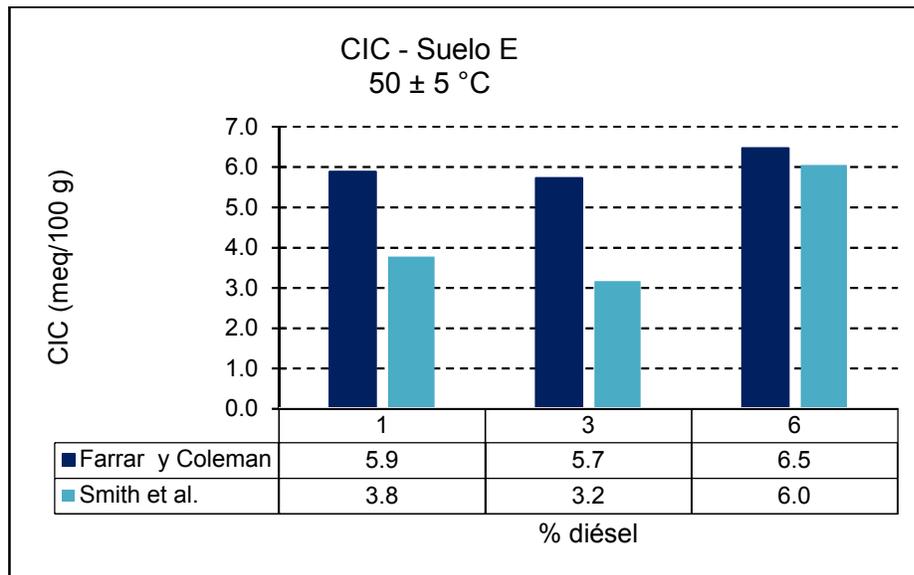


Figura 76. CIC del suelo E con base en los resultados de LL a 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

De acuerdo con los resultados obtenidos se infiere que el incremento en los límites de consistencia del suelo, se relaciona con el incremento en la CIC del suelo por la presencia del hidrocarburo, donde se requiere de una mayor cantidad de agua para

el cambio de consistencia del suelo por la cohesión adicional que ejerce el diésel a las partículas de arcilla.

6.5.6 Clasificación del suelo según SUCS.

Para aplicar el sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS) se requirió conocer el límite líquido, índice de plasticidad y el tamaño de las partículas, haciendo uso del criterio de la carta de plasticidad de Casagrande, Figura 77. El suelo clasificado como una arcilla de baja compresibilidad (CL) para todos los tratamientos y las temperaturas de ensayo utilizadas. La comparación entre el índice de plasticidad del suelo y el IP de la línea A se presentan en la Figura 78 y Figura 79 para las temperaturas de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizadas dentro de la investigación.

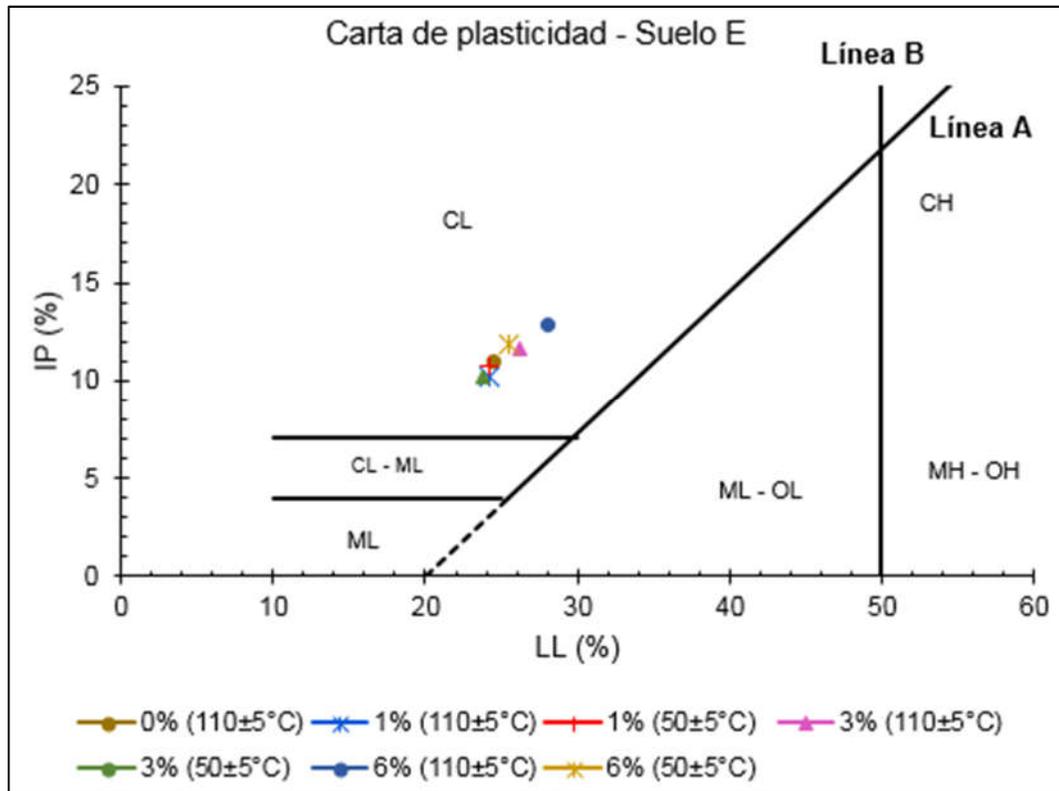


Figura 77. Carta de plasticidad de Casagrande para el suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

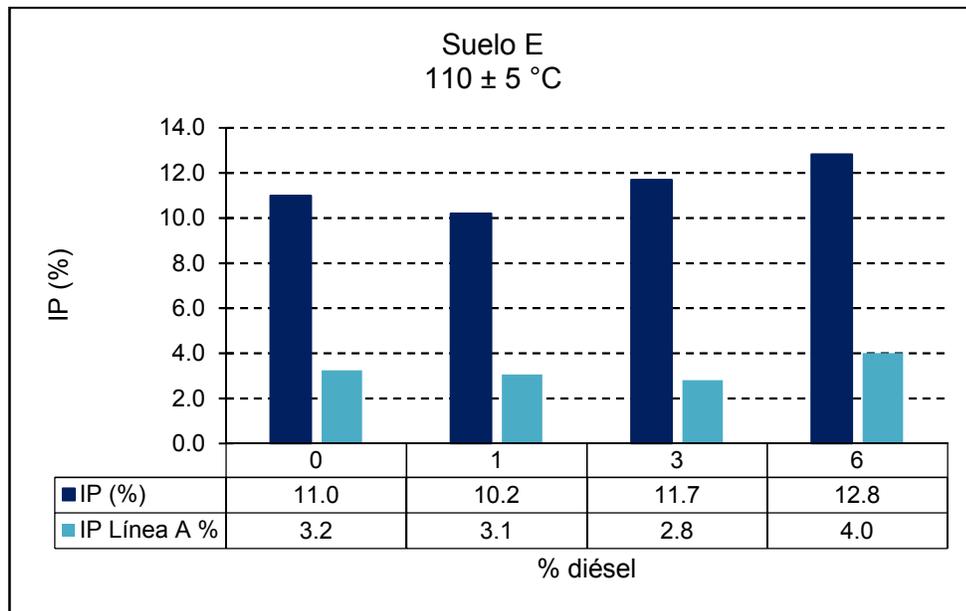


Figura 78. Relación ente el IP del suelo E y el IP de la línea A (110±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

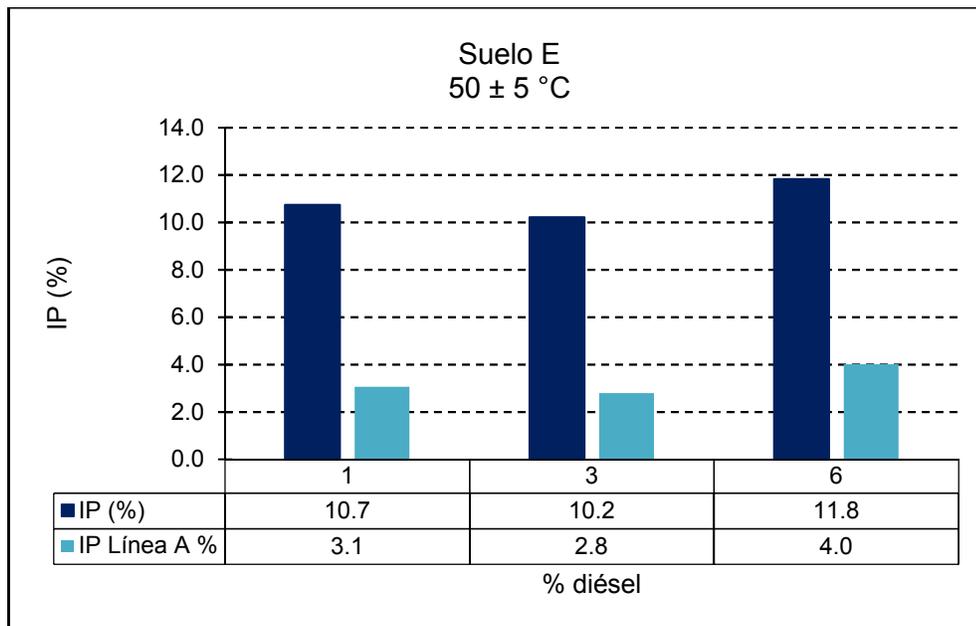


Figura 79. Relación ente el IP del suelo E y el IP de la línea A (50±5 °C). Fuente: Elaboración de la autora.

6.5.7 Resistencia a la compresión inconfiada.

Las muestras para la realización de este ensayo tenían porcentajes de diésel de 0%, 1%, 3% y 6%. Se definió como parámetro de control la densidad seca de 1.98 g/cm³, de acuerdo con la humedad inicial suministrada a las muestras del 9.5%, la densidad total del suelo corresponde a 2.17 g/cm³; para tal fin las probetas se compactaron de acuerdo con el volumen del recipiente de PVC de compactación, 91.13 cm³, y la densidad total definida anteriormente.

En la Figura 80 se observa la pérdida de resistencia del suelo en la medida que se incrementa la cantidad de diésel, viéndose reducida la capacidad para deformarse, la cual es más notoria para el tratamiento de 6% de diésel donde alcanza una deformación unitaria de 2.2%. Al trabajar con muestras alteradas la falla que se presenta es frágil. La resistencia pasa de 246.7 KPa a 112.3 KPa para el tratamiento de 6% de diésel que representa una reducción del 54.5%.

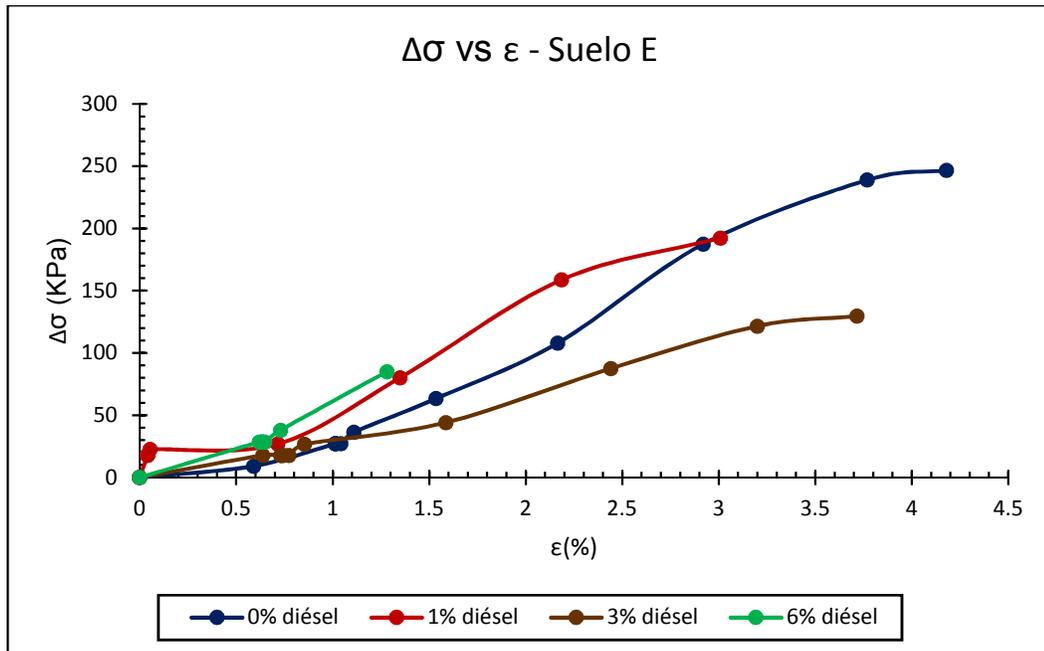


Figura 80. Esfuerzo vs deformación unitaria del suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

Por otra parte, en el tratamiento del 3% de diésel se presenta una reducción de la deformación unitaria del 11.1% respecto a la muestra control, el tratamiento del 1% de diésel presenta una reducción del 28.0%. La mayor pérdida de resistencia se presenta para el tratamiento del 6% de diésel.

Así mismo, se observa que para el tratamiento del 1% de diésel la rigidez del suelo aparentemente aumenta frente a la muestra sin tratamiento y con tratamiento del 3% y 6% de diésel respectivamente, pero la falla se presenta primero con respecto a la muestra control y la muestra con tratamiento del 3% de diésel.

La Figura 81 ilustra los valores de resistencia a la compresión inconfiada y resistencia al corte del suelo E, se aprecia que estos parámetros de resistencia disminuyen con el incremento en el contenido de diésel. Sin embargo, para los tratamientos del 3% y 6%, la disminución de la resistencia empieza a estabilizarse siendo menor en proporción con el tratamiento del 1% de diésel. Este comportamiento de disminución de los parámetros de resistencia fue reportado por Walia et al. (2013) y Nasehi et al. (2016).

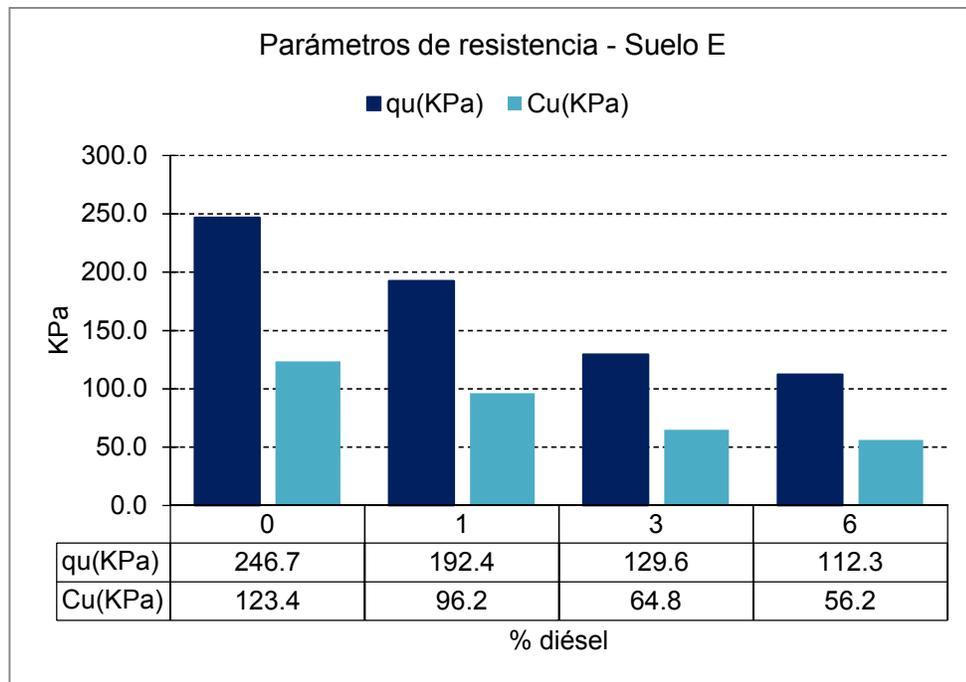


Figura 81. Variación de los parámetros de resistencia del suelo E con el porcentaje de diésel. Fuente: Elaboración de la autora.

Este comportamiento se atribuye a que la resistencia al corte del suelo es influenciada por las fuerzas de atracción y repulsión entre sus partículas. Al tener en su estructura diésel, un fluido no polar con baja constante dieléctrica se afecta la doble capa difusa del suelo (Zárate, 2014). El espesor de la doble capa difusa es función de la constante dieléctrica de los fluidos de poros del suelo, por tanto, al tener en los poros agua y diésel se reduce la constante dieléctrica, lo que implica que disminuye la capacidad de los fluidos de separar iones de cargas opuestas y se incrementan las fuerzas de atracción, llevando a una reducción de la resistencia a la compresión inconfiada y la resistencia al corte.

Analizando los datos existe una asociación lineal negativa muy fuerte del 91.7% entre los parámetros de resistencia (resistencia a la compresión no confinada y la resistencia al corte) y el porcentaje de diésel. Por lo cual, el suelo E sometido al proceso de impregnación de diésel perdió resistencia en la medida que se incrementó la cantidad de diésel en su estructura.

6.5.8 Relaciones gravimétricas y volumétricas.

Las relaciones gravimétricas y volumétricas se obtuvieron con base en los diagramas de fase presentados en el Anexo 29, los cuales se desarrollaron a partir de los datos del ensayo de compresión inconfiada, en el cual se calculó la densidad total del suelo y su humedad. Adicional, el valor de la gravedad específica de los sólidos se determinó en laboratorio y sus resultados se presentaron en el numeral 6.5.3. Con estas tres (3) variables conocidas se desarrolló el diagrama de fase para cada porcentaje de hidrocarburo impregnado al suelo y para cada una de las temperaturas de ensayo, donde la cantidad de hidrocarburo se estimó como porcentaje del peso seco del suelo y la cantidad de agua presente en el suelo como la diferencia entre la masa total y la masa de sólidos más diésel; se realizó de esta forma la estimación para tener como variable de control el peso unitario total del suelo y evidenciar los cambios en su estructura con el incremento del hidrocarburo. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 38.

Tabla 38. Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo E.

	Diésel						
	0%	1%		3%		6%	
	110±5 °C	110±5 °C	50±5 °C	110±5 °C	50±5 °C	110±5 °C	50±5 °C
γ_t (KN/m ³)	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3
γ_d (KN/m ³)	19.4	19.5	19.7	19.3	19.7	19.1	19.6
e	0.37	0.34	0.34	0.35	0.32	0.34	0.31
η (%)	26.8	25.3	25.6	26.0	24.0	25.3	23.8
S (%)	69.9	72.6	63.1	82.7	68.0	89.5	72.9
ω (%)	9.5	9.2	8.0	10.5	8.2	11.7	8.7

Fuente: Elaboración de la autora.

La relación de vacíos de este suelo E (CL) disminuye en la medida que se incrementa el contenido de diésel en su estructura, debido a que se presenta un aparente aumento del volumen de los sólidos por el aumento de las fuerzas de atracción, originando que las partículas sólidas del suelo se acerquen entre ellas y generen una cohesión aparente. Esto indica que el diésel fomenta la capacidad del agua para formar estructuras floculadas con las partículas del suelo, tal como lo evidencia Nasehi et al. (2016).

La porosidad al ser función de la relación de vacíos también disminuye con el incremento de diésel en la estructura del suelo. La temperatura de ensayo de 50±5 °C produce cambios más notorios frente a la temperatura de 110±5 °C.

El grado de saturación del suelo es función de los vacíos en su estructura, por tanto, el diésel empieza a ocupar los espacios de poros del suelo a tal punto que con un contenido de 6% de diésel, representado en peso seco del suelo, se alcanza la saturación del suelo para la temperatura de ensayo de 110±5 °C. Esta es una condición extrema que pone en evidencia la pérdida de resistencia del suelo y la formación aparente de estructuras floculadas.

No obstante, al ser estos parámetros determinados a partir de los datos de laboratorio de contenido de humedad y gravedad específica de los sólidos del suelo E (CL), se evidencia una incertidumbre experimental del 10.5%, la cual es aceptable dentro de la validez de los resultados obtenidos de relación de vacíos, porosidad y

grado de saturación de las unidades experimentales de este suelo, teniendo en cuenta el número de unidades experimentales para este suelo dentro de la investigación.

6.5.9 Análisis de asociación entre propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorio.

Los análisis de asociación fueron realizados con el software de análisis estadístico SPSS de IBM, usando asociaciones por distancias entre variables y considerando como medida de similitud la correlación de Pearson.

Para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C se encontró una asociación lineal negativa muy fuerte del 85.3%, 96.6% y 95.5% entre la gravedad específica de los sólidos y, el límites líquido, límite plástico y límite de contracción respectivamente; una asociación lineal positiva muy fuerte del 95.0%, 85.6% y 97.4% entre el límite líquido y, el límite plástico, límite de contracción e índice de plasticidad respectivamente; y una asociación positiva muy fuerte del 96.8% y 85.6% entre el límite plástico y, el límite de contracción e índice de plasticidad respectivamente.

Respecto a la temperatura de 50 ± 5 °C se encontró una asociación lineal negativa perfecta del 99.9% entre la gravedad específica de los sólidos y el límite plástico; y una asociación lineal positiva muy fuerte del 99.2% entre el límite líquido y el índice de plasticidad.

Así mismo, la reducción en la relación de vacíos y la porosidad se asocia a la capacidad del diésel para fomentar que el agua forme estructuras floculadas con las partículas de suelo. Y la saturación aumento en la medida que se incrementó el hidrocarburo porque ocupó los espacios vacíos del suelo.

Los valores obtenidos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se incrementan con el aumento en el porcentaje de hidrocarburo presente en el suelo por estar en función del límite líquido, es decir, se obtuvieron de correlaciones que tienen sus propias incertidumbres. Es preciso indicar que, medir en el laboratorio la

CIC es bastante complejo y sus procedimientos pueden afectar las propiedades del suelo, puesto que se requiere un método que pueda medir la capacidad de los suelos de adsorber cationes de una solución acuosa con el mismo pH, fuerza iónica, constante dieléctrica y composición, sumado a los componentes químicos de la solución acuosa (por ejemplo, acetato de amonio y acetato de sodio) que pueden interactuar con los suelos finos y modificar sus propiedades, por tanto, no se obtendrían los valores reales de CIC; de ahí que, al emplear las correlaciones se obtuvieron unos estimativos para evidenciar el comportamiento que presentaba el suelo a nivel de interacción química (modificación de su capacidad para retener cationes de cambio) con la presencia del diésel y su influencia en el comportamiento de expansión.

La clasificación del suelo es función de los límites líquido y plástico, donde se encuentran cuatro tipos de suelos. Este suelo E clasificó como arcilla de baja compresibilidad (CL) y no se vio alterada su clasificación con la adición del diésel en las diferentes unidades experimentales, no obstante, al ser variable el comportamiento de los límites producto de la interacción del suelo con el diésel, su plasticidad puede variar y se podría presentar un cambio en la clasificación para los valores más cercanos a las fronteras que se encuentran en la carta de plasticidad con porcentajes mayores del 6% de hidrocarburo presentes en el suelo.

6.6. Variación de las Propiedades Geotécnicas Medibles en el Laboratorio

A continuación, se presenta gráficamente el comportamiento de cada uno los cuatro (4) tipos de suelos arcillosos con respecto a sus propiedades geotécnicas determinadas con ensayos de laboratorio, las cuales corresponden a contenido de humedad, gravedad específica de los sólidos, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, límite de contracción y resistencia a la compresión inconfiada; de tal forma que el lector ilustre las variaciones ocasionadas por la interacción del diésel con la estructura del suelo.

6.6.1 Contenido de humedad.

En la Figura 82 y Figura 83 se observa el cambio en la propiedad de las unidades experimentales A, B, C y E, donde se aprecian mejor los cambios de la propiedad a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, cuya tendencia es creciente para la unidad experimental E. No obstante, los cambios que produce el hidrocarburo en el contenido de humedad a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C no son tan evidentes como cuando se presentaron las gráficas por cada tipo de suelo, sumado a que las incertidumbres son bajas (véase numerales 6.2.2, 6.3.2, 6.4.2 y 6.5.2). Por tanto, no hay un cambio marcado en el valor de la propiedad gráficamente observable.

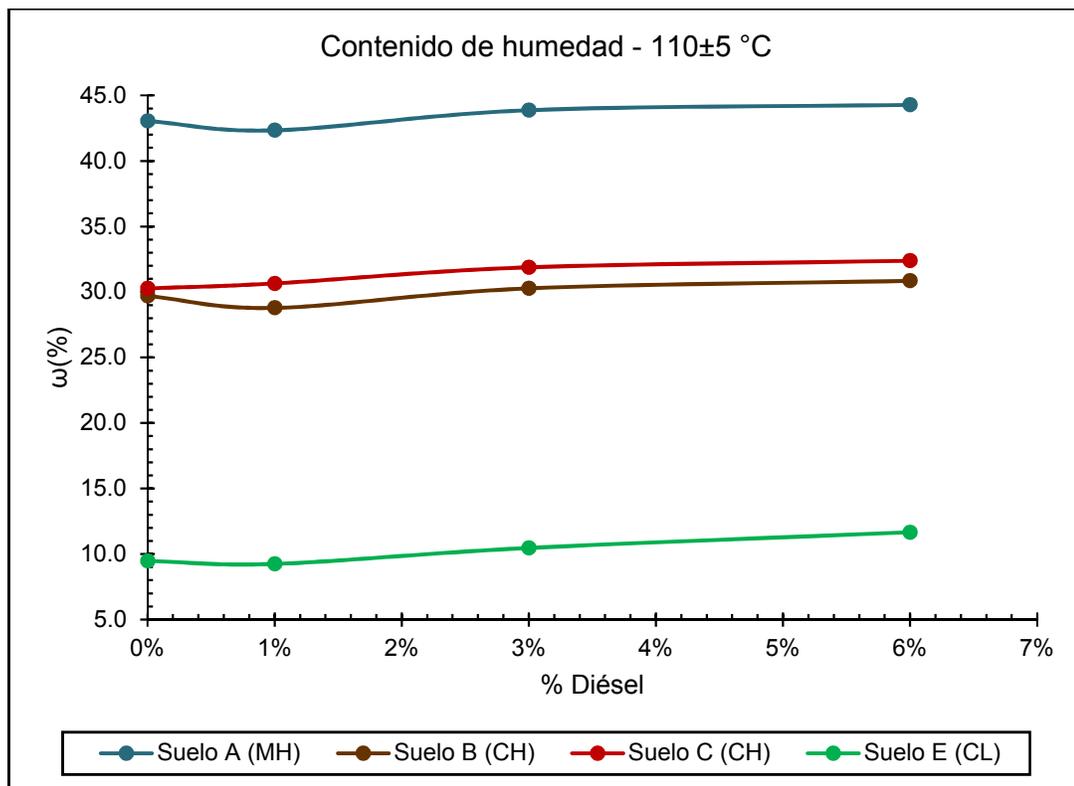


Figura 82. Contenido de humedad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

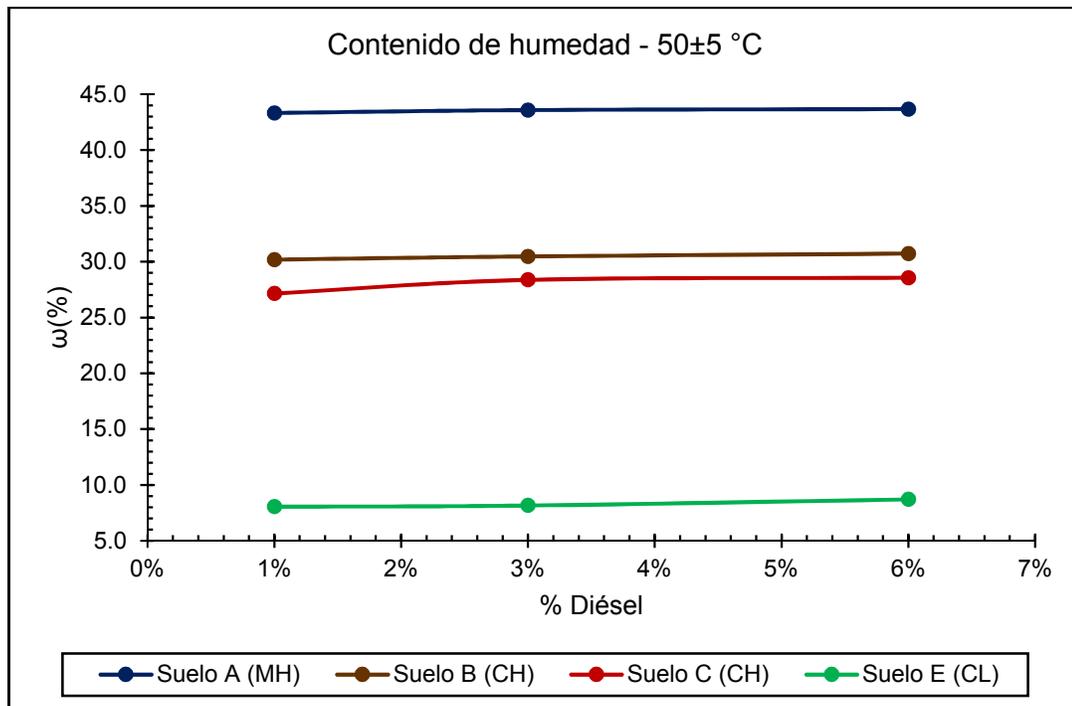


Figura 83. Contenido de humedad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

No obstante, la expresión con la cual se realiza el cálculo del contenido de humedad (6.1) como se referencio en el numeral 3.2.1, es la relación entre el peso de agua y el peso de los sólidos. Con dicha expresión se determinaron los contenidos de humedad teóricos de cada una de las muestras sin diésel.

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

(6.1)

Ahora bien, cuando hay presencia de diésel en el suelo el contenido de humedad no es correcto determinarlo con la expresión (6.1) debido a que el diésel no es agua, es decir, el contenido de humedad es con respecto a la fracción de agua presente en el suelo, no con respecto a la fracción de fluidos presentes en el suelo. Por lo tanto, el contenido de humedad teórico será el contenido de humedad de las muestras sin diésel más el porcentaje de diésel presente en la muestra, obteniendo la siguiente expresión:

$$\omega_{teórico}(\%) = \left(\frac{W_w}{W_s} + \frac{W_{diésel}}{W_s} \right) \times 100 = \omega(\%) + \% diésel \quad (6.2)$$

Al realizar los cálculos con la expresión (6.2) se obtienen los resultados de contenido de humedad teóricos presentados en la Tabla 39.

Tabla 39. Valores teóricos de contenido de humedad

% diésel	Suelo A (MH)	Suelo B (CH)	Suelo C (CH)	Suelo E (CL)
0%	45.0	30.0	30.0	9.0
1%	46.0	31.0	31.0	10.0
3%	48.0	33.0	33.0	12.0
6%	51.0	36.0	36.0	15.0

Fuente: Elaboración de la autora.

Al realizar el ensayo de contenido de humedad según la normatividad vigente referenciada en el numeral 5.3.1 se encuentra una variación en el valor de la propiedad como se evidencio en la Figura 82 y Figura 83.

Partiendo de ello, en la Figura 84 se presenta la comparación del valor del contenido de humedad teórico del suelo A (limo de alta compresibilidad) con respecto al valor de esta propiedad obtenido por medio de ensayos de laboratorio, donde se observa que independiente de la temperatura de ensayo el valor de la propiedad es inferior al valor teórico. Esto se atribuye a que durante el proceso de secado parte del diésel se adhirió a las partículas sólidas del suelo generando un aumento de su masa, y por ende el descenso del valor de la propiedad. Lo cual corrobora que durante los procesos de secado este hidrocarburo puede quedar de forma remanente en las partículas sólidas del suelo. Así mismo, se observa que según la temperatura de ensayo el valor de la propiedad presenta cambios, con tendencia a tener una mayor tasa de evaporación del diésel a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, exceptuando el tratamiento del 1% de diésel, lo cual se atribuye a la volatilidad del hidrocarburo y su interacción con el suelo.

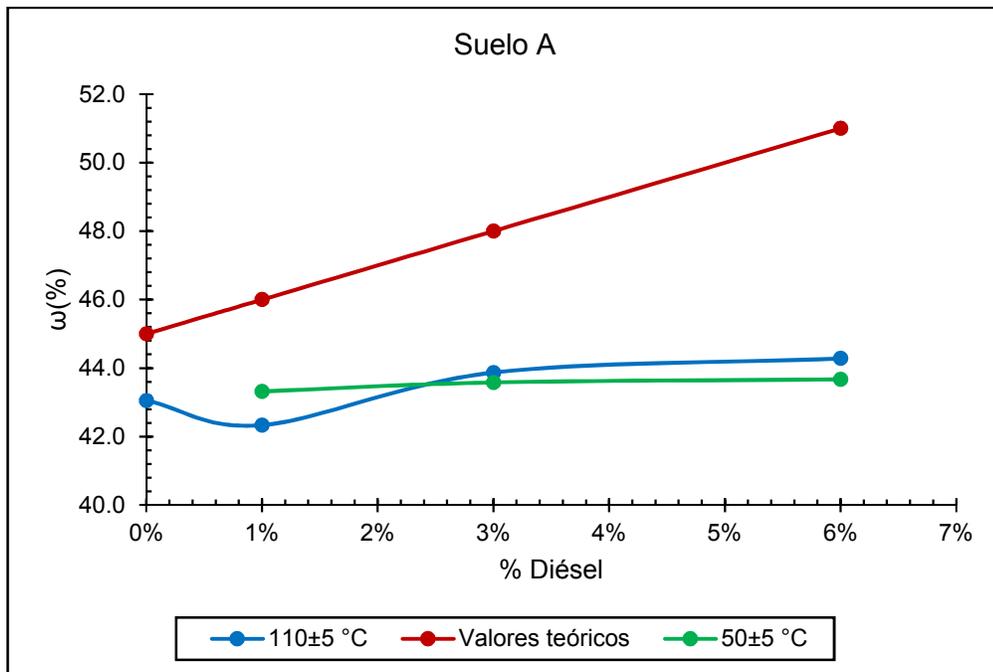


Figura 84. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo A. Fuente: Elaboración de la autora.

En la Figura 85 se presenta la comparación del valor del contenido de humedad teórico del suelo B (arcilla de alta compresibilidad) con respecto al valor de esta propiedad obtenido por medio de ensayos de laboratorio, donde se observa que independiente de la temperatura de ensayo el valor de la propiedad es inferior al valor teórico. Esto se atribuye a que durante el proceso de secado parte del diésel se adhirió a las partículas sólidas del suelo generando un aumento de su masa, y por ende el descenso del valor de la propiedad. Lo cual corrobora que durante los procesos de secado este hidrocarburo puede quedar de forma remanente en las partículas sólidas del suelo. Así mismo, se observa que según la temperatura de ensayo el valor de la propiedad presenta cambios, cuya tendencia no es definida puesto que se esperaría una mayor tasa de evaporación del hidrocarburo a la temperatura de ensayo de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura de $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero esto no es evidenciable y se atribuye a la volatilidad del hidrocarburo y su interacción con el suelo.

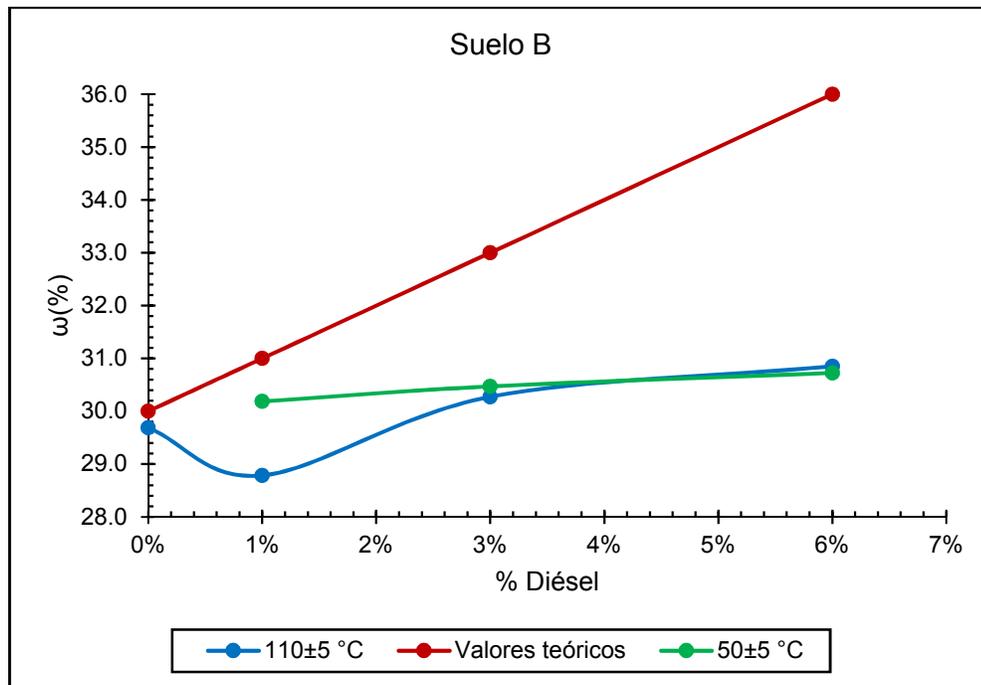


Figura 85. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo B. Fuente: Elaboración de la autora.

En la Figura 86 se presenta la comparación del valor del contenido de humedad teórico del suelo C (arcilla de alta compresibilidad) con respecto al valor de esta propiedad obtenido por medio de ensayos de laboratorio, donde se observa que independiente de la temperatura de ensayo el valor de la propiedad es inferior al valor teórico. Esto se atribuye a que durante el proceso de secado parte del diésel se adhirió a las partículas sólidas del suelo generando un aumento de su masa, y por ende el descenso del valor de la propiedad. Lo cual corrobora que durante los procesos de secado este hidrocarburo puede quedar de forma remanente en las partículas sólidas del suelo. Así mismo, se observa que según la temperatura de ensayo el valor de la propiedad presenta cambios, con tendencia a tener una mayor tasa de evaporación del diésel a la temperatura de ensayo de 110±5 °C.

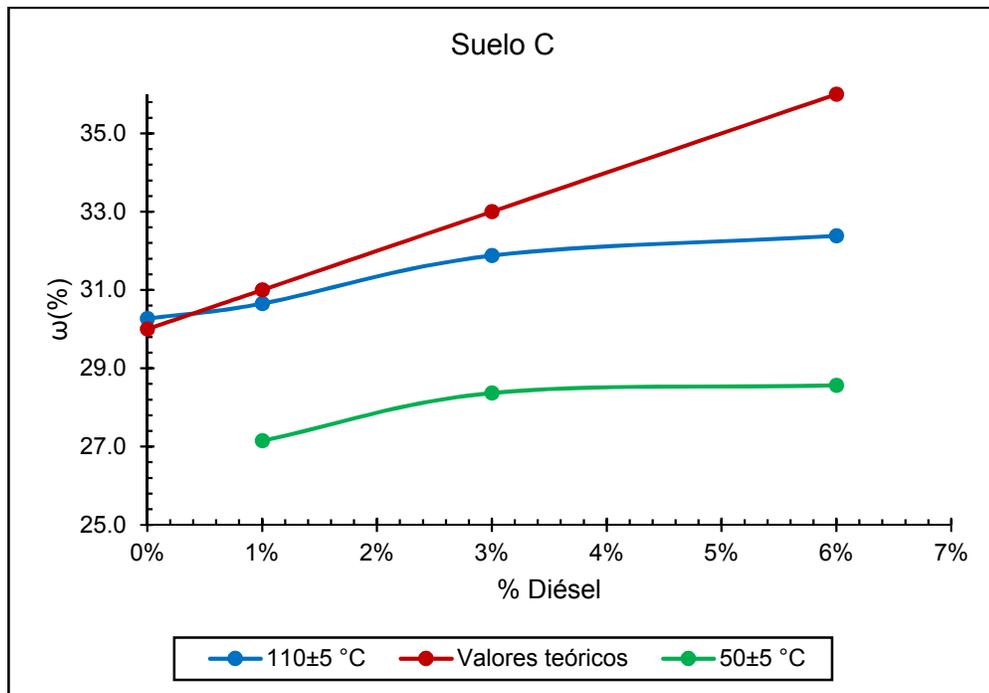


Figura 86. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo C. Fuente: Elaboración de la autora.

En la Figura 87 se presenta la comparación del valor del contenido de humedad teórico del suelo E (arcilla de baja compresibilidad) con respecto al valor de esta propiedad obtenido por medio de ensayos de laboratorio, donde se observa que independiente de la temperatura de ensayo el valor de la propiedad es inferior al valor teórico. Esto se atribuye a que durante el proceso de secado parte del diésel se adhirió a las partículas sólidas del suelo generando un aumento de su masa, y por ende el descenso del valor de la propiedad. Lo cual corrobora que durante los procesos de secado este hidrocarburo puede quedar de forma remanente en las partículas sólidas del suelo. Así mismo, se observa que según la temperatura de ensayo el valor de la propiedad presenta cambios, con tendencia a tener una mayor tasa de evaporación del diésel a la temperatura de ensayo de 110±5 °C.

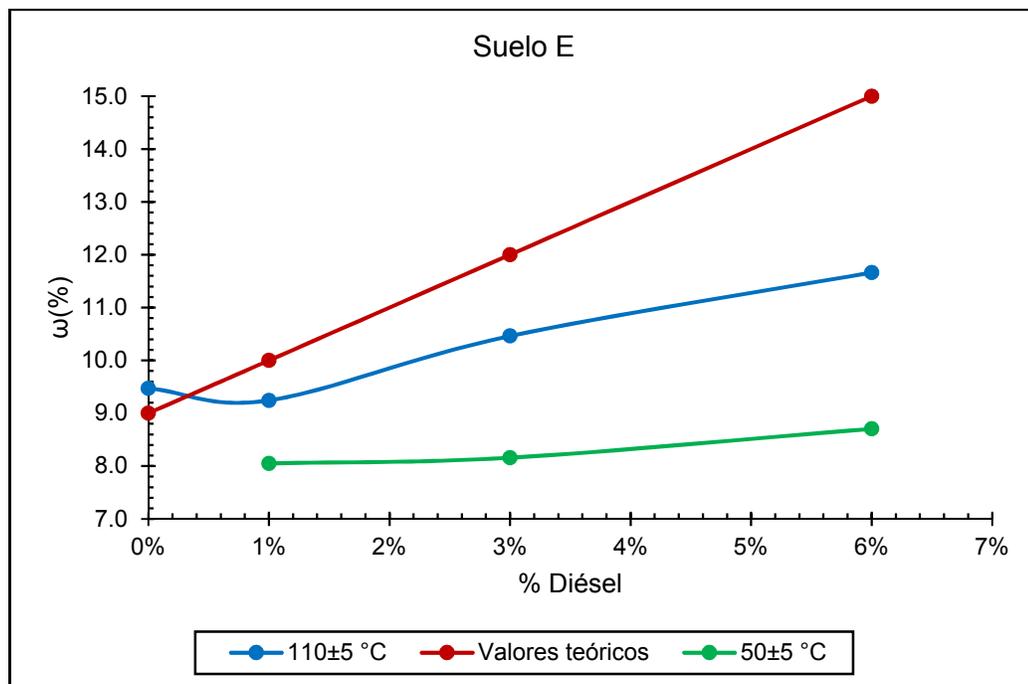


Figura 87. Comparación del contenido de humedad teórico con el obtenido por medio de ensayos de laboratorio para el suelo E. Fuente: Elaboración de la autora.

6.6.2 Gravedad específica de los sólidos.

En la Figura 88 y Figura 89 se presentan los resultados de la gravedad específica de los sólidos para las unidades experimentales A, B, C y E, donde se aprecia un descenso marcado de la propiedad para la temperatura de ensayo de 110±5 °C con respecto a la temperatura de ensayo de 60 °C. En la Figura 88 se observa un descenso marcado en la unidad experimental C, y en las demás unidades experimentales la propiedad descende y gráficamente su tendencia no es tan notoria. Por otra parte, los resultados a la temperatura de ensayo de 60°C evidencian el comportamiento de descenso del valor de la propiedad para todas las unidades experimentales.

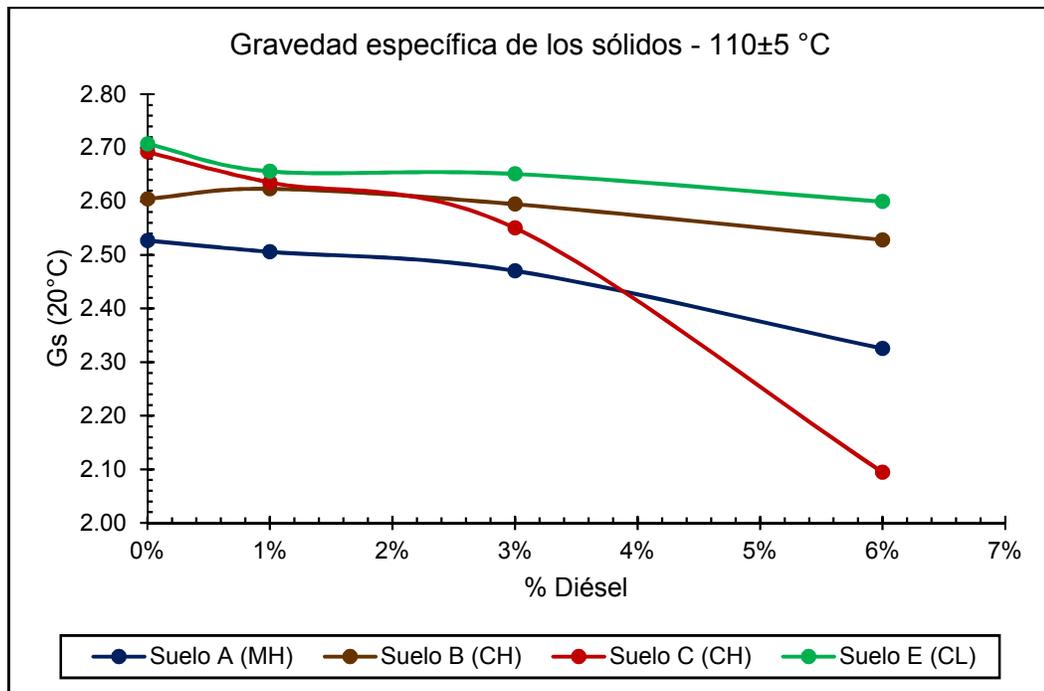


Figura 88. Gravedad específica de los sólidos de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

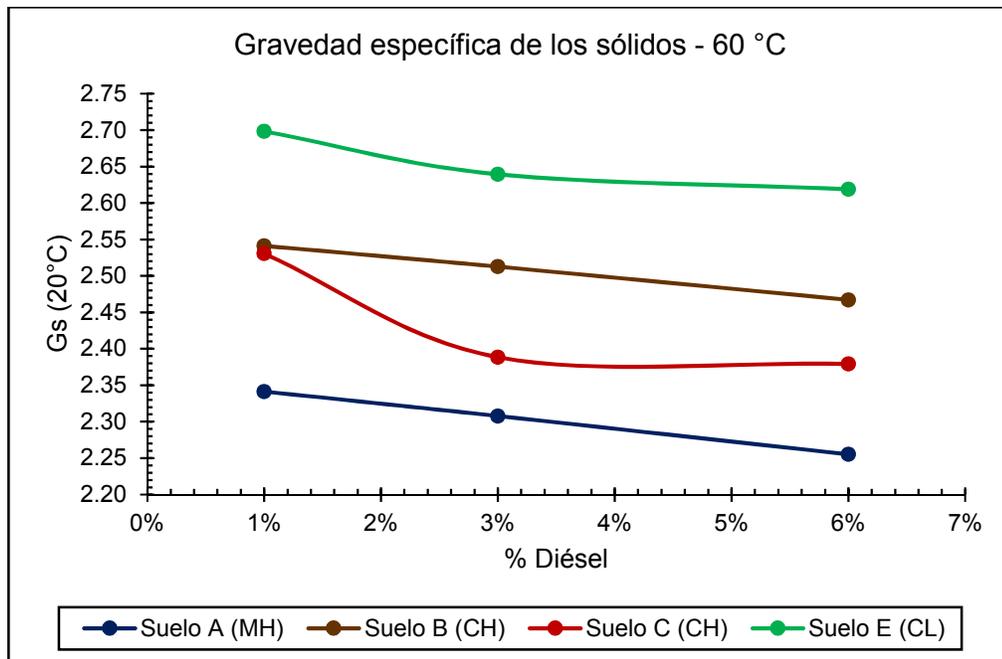


Figura 89. Gravedad específica de los sólidos de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 60 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

6.6.3 Límite líquido.

En la Figura 90 y Figura 91 se presentan los resultados del límite líquido para las unidades experimentales A, B, C y E, donde se aprecia que el límite líquido para las unidades experimentales A, C y E tienen tendencia ascendente, y para la unidad experimental B se tiene tendencia al descenso, sin ser marcadas estas tendencias para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Con respecto a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C se observa que la propiedad tiene tendencia ascendente para las unidades experimentales C y E, la unidad experimental A se aprecia con tendencia constante, y la unidad experimental B disminuye y luego aumenta. En general, el comportamiento del límite líquido no tiene una tendencia definida. Para apreciar claramente el comportamiento de cada unidad experimental con sus respectivos valores, véase los numerales 6.2.4.1, 6.3.4.1, 6.4.4.1 y 6.5.4.1.

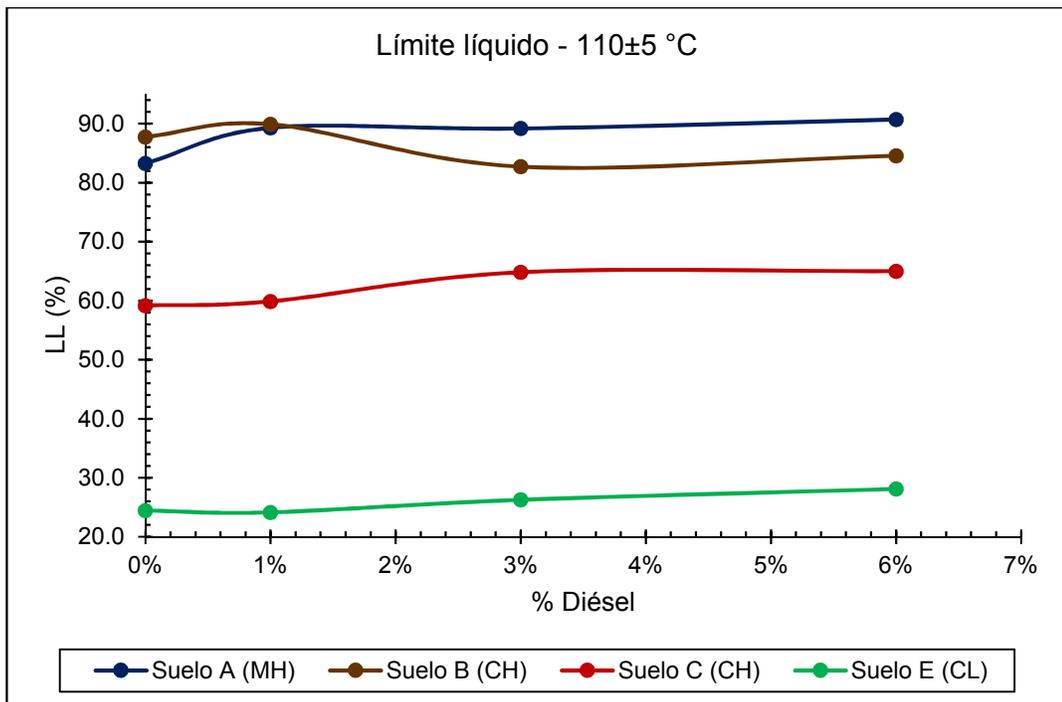


Figura 90. Límite líquido de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

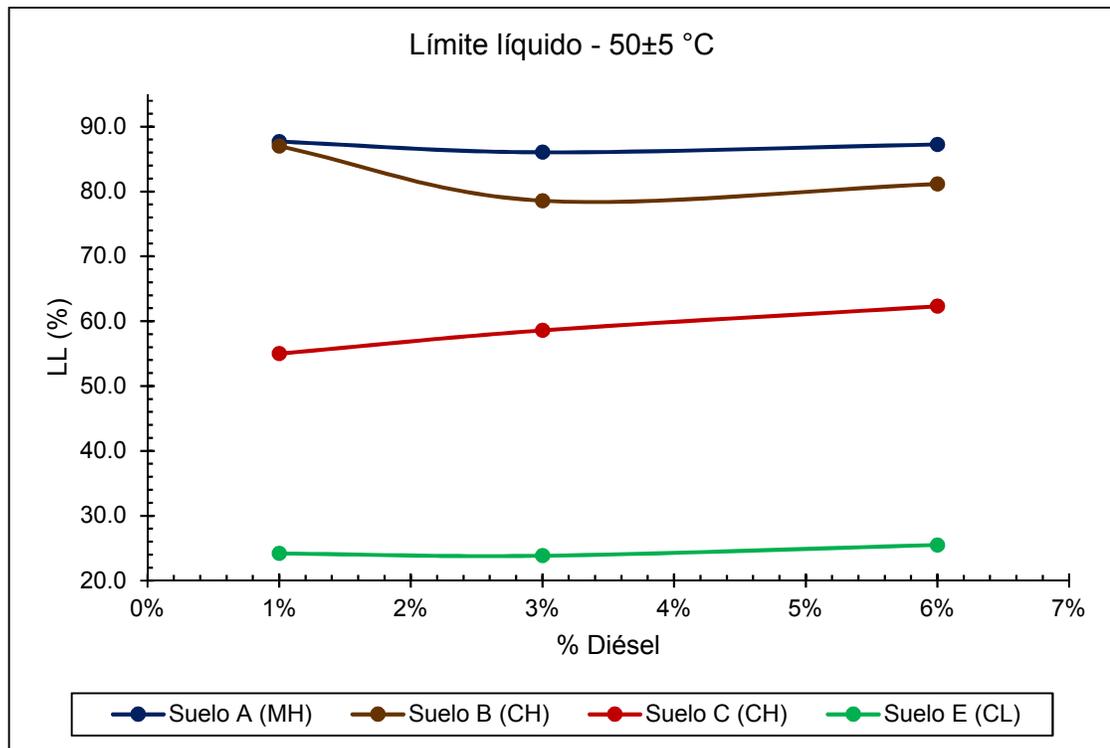


Figura 91. Límite líquido de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

6.6.4 Límite plástico.

En la Figura 92 y Figura 93 se presentan los resultados del límite plástico para las unidades experimentales A, B, C y E, donde se aprecia que el límite aumenta y disminuye con los diferentes tratamientos de diésel utilizados en las unidades experimentales. En general, el comportamiento del límite plástico no tiene una tendencia definida a la temperatura de 110±5 °C. Con respecto a la temperatura de 50±5 °C se observa que no hay un comportamiento definido para esta propiedad, no obstante, gráficamente para la unidad experimental A se aprecia la tendencia ascendente de la propiedad, y en las demás unidades experimentales sus cambios no son apreciables fácilmente, para ver en detalle el comportamiento de cada unidad experimental véase los numerales 6.2.4.2, 6.3.4.2, 6.4.4.2 y 6.5.4.2.

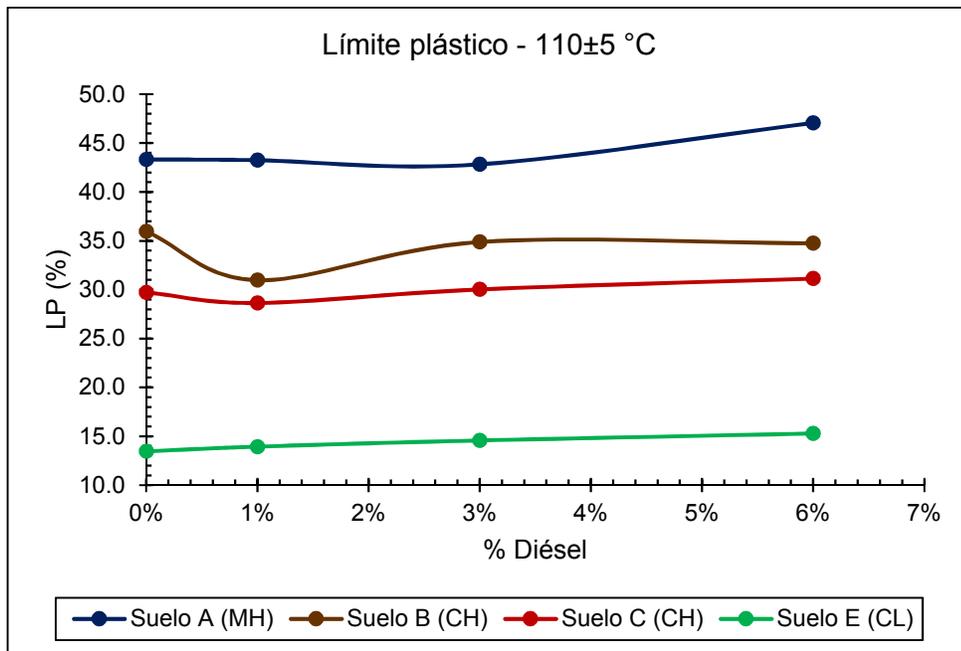


Figura 92. Límite plástico de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

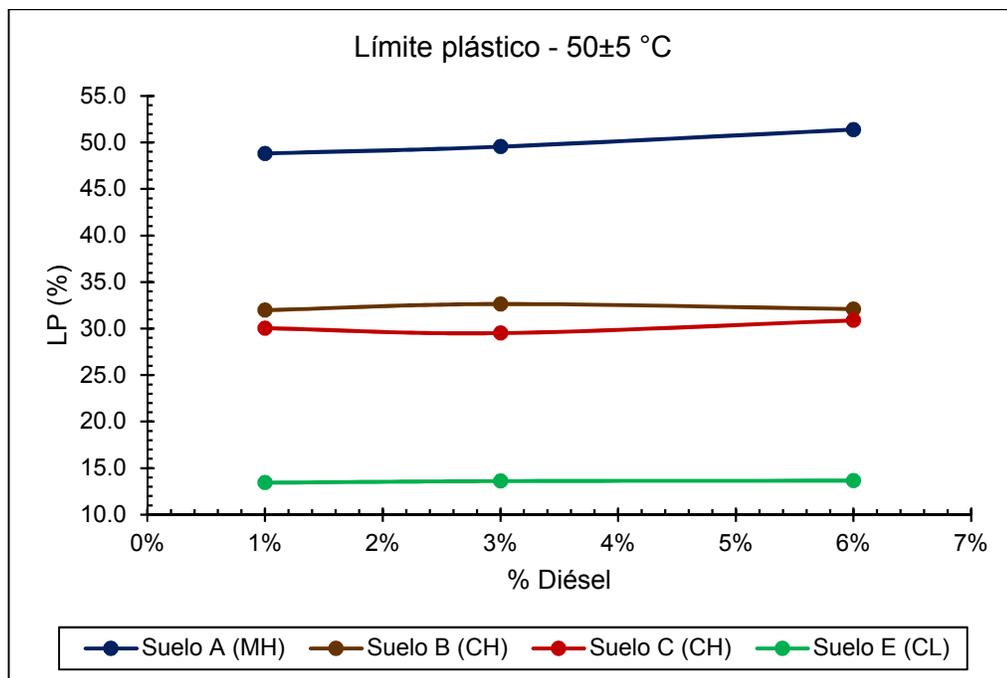


Figura 93. Límite plástico de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

6.6.5 Índice de plasticidad.

En la Figura 94 y Figura 95 se presentan los resultados del índice de plasticidad para las unidades experimentales A, B, C y E, donde se observa que al ser el índice de plasticidad función del límite líquido y el límite plástico su tendencia es indefinida para las temperaturas de ensayo de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. No obstante, se observa que para las unidades experimentales C y E gráficamente tienen una tendencia ascendente, y las unidades experimentales A y B tienen una tendencia al descenso, sin que estas tendencias sean marcadas tanto para la temperatura de ensayo de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ como para la temperatura de ensayo de $50\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para apreciar claramente el comportamiento de cada unidad experimental con sus respectivos valores, véase los numerales 6.2.4.4, 6.3.4.4, 6.4.4.4 y 6.5.4.4.

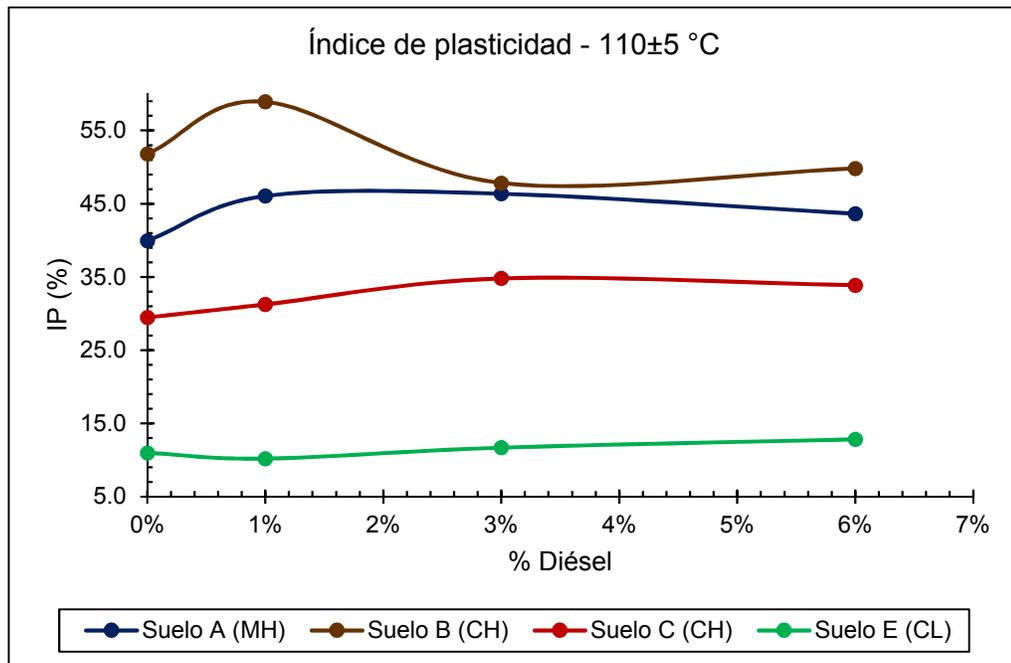


Figura 94. Índice de plasticidad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de $110\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fuente: Elaboración de la autora.

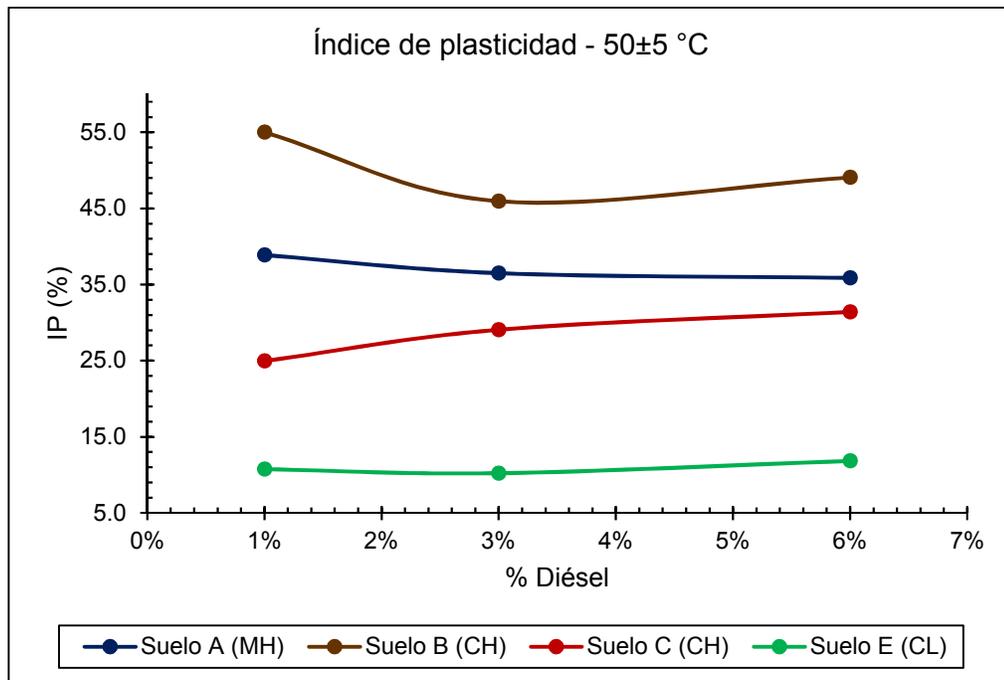


Figura 95. Índice de plasticidad de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50 ± 5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

6.6.6 Límite de contracción.

En la Figura 96 y Figura 97 se presentan los resultados del límite de contracción para las unidades experimentales A, B, C y E, donde se aprecia la tendencia indefinida de esta propiedad para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C y 50 ± 5 °C. No obstante, las unidades experimentales A y E tienen un comportamiento ascendente para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C; sin embargo, las unidades experimentales E cambian de tendencia (ligero descenso) para la temperatura de 50 ± 5 °C. Las unidades experimentales C tienen un comportamiento descendente para la temperatura de ensayo de 110 ± 5 °C, sin embargo, cambian esta tendencia para la temperatura de 50 ± 5 °C. Las unidades experimentales B tienen una tendencia al descenso de la propiedad para ambas temperaturas. Para apreciar claramente el comportamiento de cada unidad experimental con sus respectivos valores, véase los numerales 6.2.4.3, 6.3.4.3, 6.4.4.3 y 6.5.4.3.

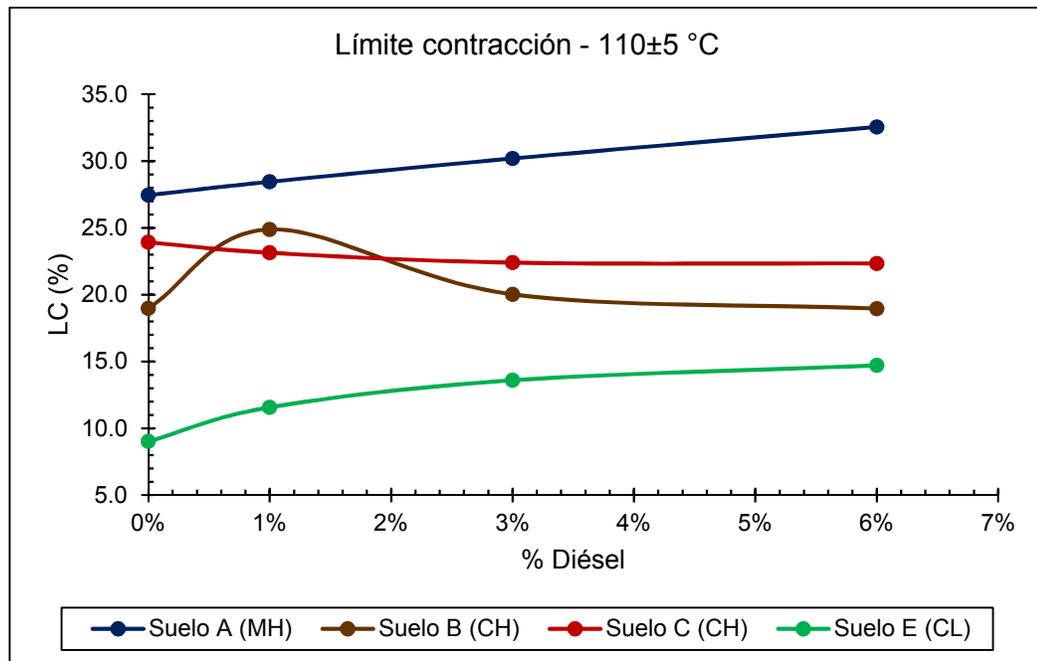


Figura 96. Límite de contracción de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 110±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

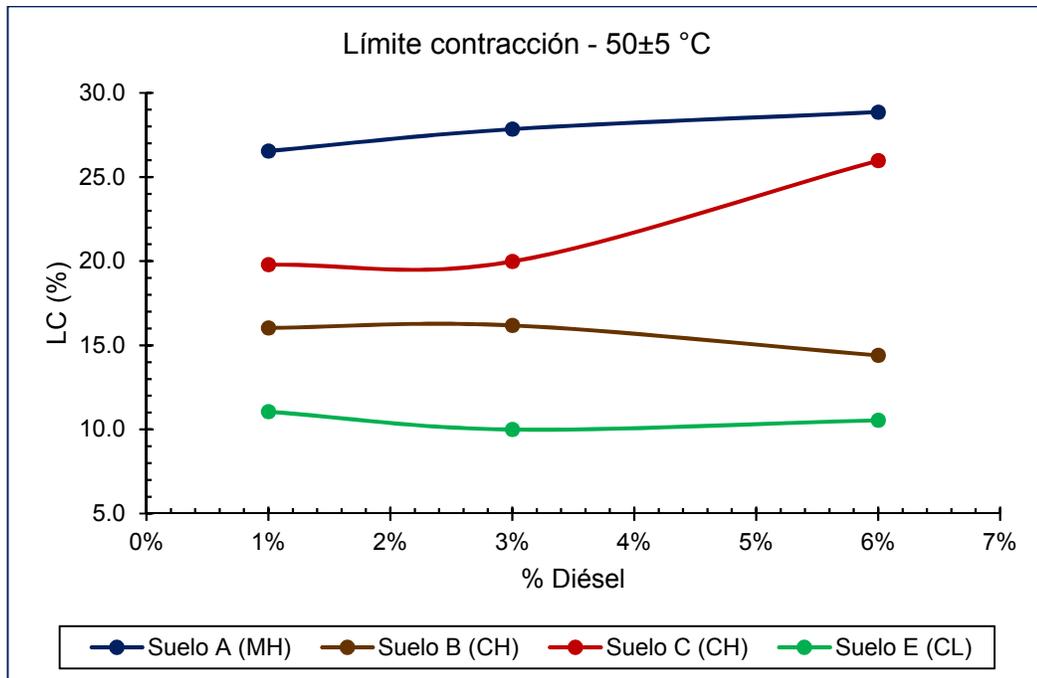


Figura 97. Límite de contracción de los suelos A, B, C y E a la temperatura de ensayo de 50±5 °C. Fuente: Elaboración de la autora.

6.6.7 Resistencia a la compresión inconfiada.

En la Figura 98 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada para las unidades experimentales A, B, C y E, donde se aprecia que la resistencia tiene una marcada tendencia al descenso, siendo más notoria para la unidad experimental E y C; la unidad experimental que presento la menor reducción de la resistencia fue la B con el 20.7%. Para apreciar el detalle del comportamiento de cada unidad experimental con sus respectivos valores, véase los numerales 6.2.7, 6.3.7, 6.4.7 y 6.5.7.

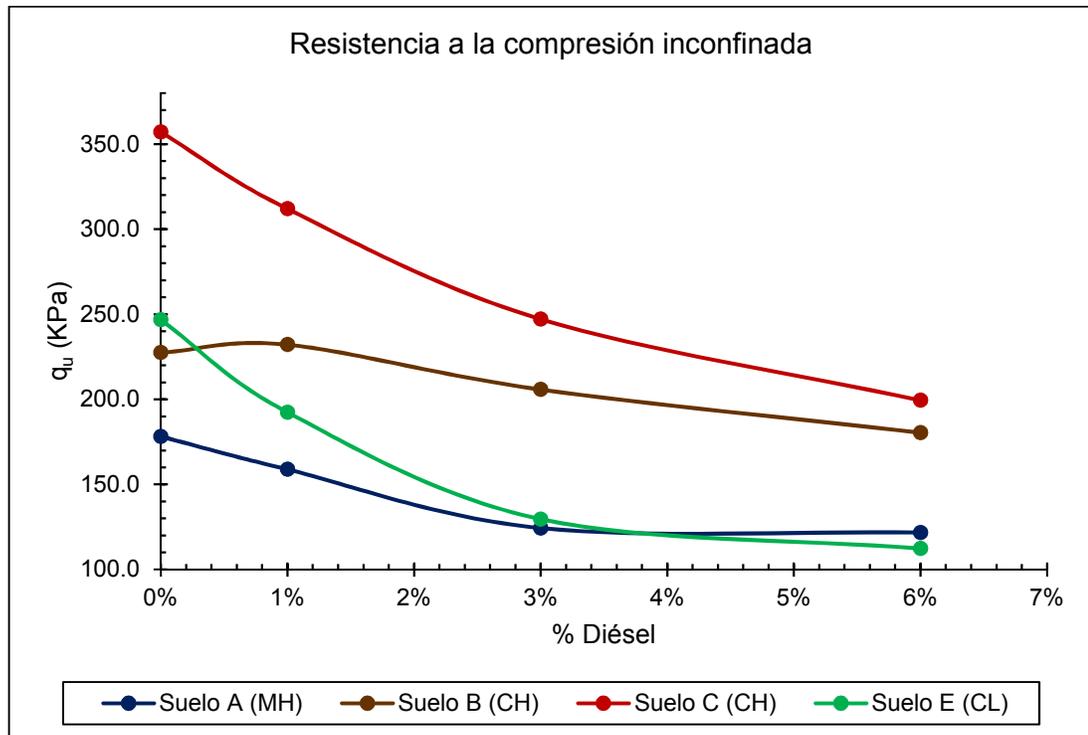


Figura 98. Resistencia a la compresión inconfiada de los suelos A, B, C y E.
Fuente: Elaboración de la autora.

Capítulo VII. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se sintetizan los resultados de la investigación para cada una de las cuatro unidades experimentales (arcillas) que se estudiaron, por tanto, estas conclusiones no se pueden generalizar para los suelos arcillosos y solo son aplicables para las características propias de los suelos objeto de esta investigación, por ende, se requiere continuar con los trabajos de investigación en esta línea. Se concluye el cambio en las propiedades geotécnicas de las unidades experimentales A, B, C y E por la presencia del diésel, pero su clasificación con el SUCS y composición mineralógica no se vio alterada. Así mismo, se presentan las recomendaciones para futuros trabajos de investigación.

7.1 Suelo A (MH)

El diésel no afectó la estructura mineralógica de la muestra tipo A que contenía 6% de diésel, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue muy corto, 7 días. Las fases cristalinas identificadas fueron tres (3), el mineral dominante fue el cuarzo y se encontraron en proporciones más bajas los minerales caolinita y arcillas 14 Å. El contenido de humedad presentó una tendencia a incrementar sin ser proporcional con la cantidad de diésel. La gravedad específica de los sólidos disminuyó. El proceso de secado al aire de esta muestra afectó el valor de los límites de Atterberg. Los límites de Atterberg fueron afectados por el diésel presentándose un incremento. La CIC tiene un leve aumento, según la expresión de su cálculo cambia la interpretación del potencial de expansión, precisando que fue determinada a partir de una correlación con el límite líquido. El suelo no cambio su clasificación de limo de alta compresibilidad (MH) según el SUCS. El suelo pierde resistencia con la presencia del diésel y reduce su capacidad para deformarse. Se reportó una disminución de la relación de vacíos, la porosidad y aumento del grado de saturación con el incremento de la presencia de diésel en el suelo, sin embargo, se debe precisar que estos parámetros se obtuvieron a partir de los resultados de laboratorio cuyas incertidumbres son aceptables. Cuando el suelo tenía 1% de diésel se presentó un comportamiento indefinido en las propiedades del suelo, por tanto, este

porcentaje es un valor de transición para el comportamiento de este suelo. La temperatura afectó los resultados de los ensayos, en donde las propiedades presentaron mayores valores a la temperatura de 110 ± 5 °C con respecto a la temperatura de 50 ± 5 °C.

7.2 Suelo B (CH)

El diésel no afectó la estructura mineralógica de la muestra tipo B que contenía 6% de diésel, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue muy corto, 7 días. Las fases cristalinas identificadas fueron tres (3), el mineral dominante fue el cuarzo y se encontraron en proporciones más bajas los minerales caolinita y arcillas 14 Å, con atenuación de las arcillas 14 Å y acentuación de la caolinita. El contenido de humedad presentó una tendencia a incrementar sin ser proporcional con la cantidad de diésel. La gravedad específica de los sólidos disminuyó. Los límites de Atterberg fueron afectados por el diésel presentándose una disminución. La CIC tiene un leve descenso, según la expresión de su cálculo cambia la interpretación del potencial de expansión, precisando que fue determinada a partir de una correlación con el límite líquido. El suelo no cambió su clasificación de arcilla de alta compresibilidad (CH) según el SUCS. El suelo pierde resistencia con la presencia del diésel y reduce su capacidad para deformarse. Se reportó una disminución de la relación de vacíos, la porosidad y aumento del grado de saturación con el incremento de la presencia de diésel en el suelo, sin embargo, se debe precisar que estos parámetros se obtuvieron a partir de los resultados de laboratorio cuyas incertidumbres son aceptables. Cuando el suelo tenía 1% y 3% de diésel se presentó un comportamiento indefinido en las propiedades del suelo, por tanto, estos porcentajes son un valor de transición para el comportamiento de este suelo. La temperatura de ensayo afecta los resultados de los ensayos siendo su comportamiento indefinido y generando incertidumbre en la estimación de los parámetros del suelo.

7.3 Suelo C (CH)

El diésel no afectó la estructura mineralógica de la muestra tipo C que contenía 6% de diésel, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue muy corto, 7 días. Las fases cristalinas identificadas fueron tres (3), el mineral dominante fue el cuarzo y se encontraron en proporciones más bajas los minerales caolinita y arcillas 14 Å, con atenuación de las arcillas 14 Å y la caolinita. El contenido de humedad presentó una tendencia a incrementar sin ser proporcional con la cantidad de diésel para la temperatura de 110 ± 5 °C y una tendencia al descenso para la temperatura de 50 ± 5 °C. La gravedad específica de los sólidos disminuyó. Los límites de Atterberg fueron afectados por el diésel presentándose un incremento en los límites líquido y plástico, pero un descenso de los límites de contracción. La CIC tiende a aumentar, según la expresión de su cálculo cambia la interpretación del potencial de expansión, precisando que fue determinada a partir de una correlación con el límite líquido. El suelo no cambió su clasificación de arcilla de alta compresibilidad (CH) según el SUCS. El suelo pierde resistencia con la presencia del diésel y reduce su capacidad para deformarse. Se reportó disminución de la relación de vacíos, la porosidad y aumento del grado de saturación con el incremento de la presencia de diésel en el suelo, sin embargo, se debe precisar que estos parámetros se obtuvieron a partir de los resultados de laboratorio cuyas incertidumbres son aceptables. Cuando el suelo tenía 1% y 3% de diésel se presentó un comportamiento indefinido en las propiedades del suelo, por tanto, estos porcentajes son un valor de transición para el comportamiento de este suelo. La temperatura de ensayo afecta los resultados de los ensayos siendo su comportamiento indefinido y generando incertidumbre en la estimación de los parámetros del suelo.

7.4 Suelo E (CL)

El diésel no afectó la estructura mineralógica de la muestra tipo E que contenía 6% de diésel, teniendo en cuenta que el periodo de exposición fue muy corto, 7 días. Las fases cristalinas identificadas fueron cinco (5), el mineral dominante fue el

cuarzo y se encontraron en proporciones más bajas los minerales micas, caolinita, feldespatos y arcillas 14 Å, pero se presentó una reducción en el porcentaje de participación de las micas, una atenuación de las arcillas 14 Å y, una acentuación de la caolinita y los feldespatos. El contenido de humedad presentó una tendencia a incrementar sin ser proporcional con la cantidad de diésel para la temperatura de 110 ± 5 °C y tendencia al descenso para la temperatura de 50 ± 5 °C. La gravedad específica de los sólidos disminuyó. Los límites de Atterberg fueron afectados por el diésel presentándose un incremento. La CIC tiende a aumentar y su potencial de expansión no cambia, se mantiene en baja expansión, precisando que fue determinada a partir de una correlación con el límite líquido. El suelo no cambió su clasificación de arcilla de baja compresibilidad (CL) según el SUCS. El suelo pierde resistencia con la presencia del diésel y reduce su capacidad para deformarse. Se reportó disminución de la relación de vacíos, la porosidad y aumento del grado de saturación con el incremento de la presencia de diésel en el suelo, sin embargo, se debe precisar que estos parámetros se obtuvieron a partir de los resultados de laboratorio cuyas incertidumbres son aceptables. Cuando el suelo tenía 1% y 3% de diésel se presentó un comportamiento indefinido en las propiedades del suelo, por tanto, estos porcentajes son un valor de transición para el comportamiento de este suelo. La temperatura de ensayo afecta los resultados de los ensayos siendo su comportamiento indefinido y generando incertidumbre en la estimación de los parámetros del suelo.

Se concluye que el diésel no genera cambios en la composición mineralógica de las unidades experimentales A, B, C y E. Sin embargo, la unidad experimental E presentó reducción en el porcentaje de micas. Los límites de Atterberg presentan cambios variables, por lo tanto, su tendencia es indefinida en las unidades experimentales A, B, C y E por la presencia del diésel; sumado a que el contenido de humedad se determinó por medio de ensayos de laboratorio con una expresión que no es correcta, puesto que cuando las muestras tienen diésel la pérdida de fluidos durante el secado en horno es de agua y diésel, en donde el cálculo de la expresión de contenido de humedad sólo es para la pérdida de agua del suelo. Por lo tanto, de acuerdo con el contenido de humedad teórico y el obtenido en los ensayos de laboratorio se concluye que parte del diésel queda remanente en estado sólido adherido a las partículas sólidas del suelo, generando un aumento de la masa de los

sólidos y por consiguiente, el valor del contenido de humedad obtenido en laboratorio es inferior al valor del contenido de humedad teórico. La clasificación del suelo empleando el SUCS no presenta cambios en las unidades experimentales A, B, C y E por la presencia del diésel. La saturación aumenta; G_s , la relación de vacíos y la porosidad disminuyen, con el incremento en el porcentaje de diésel en las unidades experimentales A, B, C y E, las cuales fueron estimadas a partir de los resultados de laboratorio cuyas incertidumbres son aceptables teniendo en cuenta el número de unidades experimentales. El diésel reduce la resistencia y la deformación unitaria de todas las unidades experimentales A, B, C y E.

Recomendaciones para futuros trabajos de investigación:

- La temperatura es un factor influyente en el valor obtenido de las diferentes propiedades índice del suelo, por ejemplo, no es concluyente el comportamiento del valor de la propiedad de los límites de Atterberg. Debido a esto se sugiere realizar más estudios con el fin de validar los resultados obtenidos, pues la literatura hasta la fecha no referencia la temperatura usada en los diversos estudios.
- Se recomienda utilizar un mayor número de muestras para evaluar cada una de las diferentes propiedades geotécnicas del suelo, con el fin de tener dentro de los criterios de validación de las investigaciones una menor incertidumbre en la estimación de estos parámetros.
- Realizar investigaciones en cuanto a las propiedades mecánicas del suelo como por ejemplo cohesión y fricción por medio de ensayos triaxiales consolidados drenados, analizando los cambios en las trayectorias p-q; y determinar los cambios en la succión del suelo cuando se tiene presencia de hidrocarburos.
- Investigar la influencia del diésel u otro hidrocarburo en el crecimiento de diferentes colonias microbianas (hongos, bacterias, etc.) en el suelo fino y cómo afectaría su fábrica, estructura y comportamiento. Por ejemplo, las técnicas de biorremediación cómo pueden afectar las propiedades geotécnicas de los suelos finos.
- Validar la expresión para la determinación del contenido de humedad, donde se tenga en cuenta la evaporación del hidrocarburo y la parte remanente en estado sólido, pues las normas existentes no tienen estas consideraciones que influyen en

el cálculo de los límites de Atterberg. Así mismo, validar las metodologías para determinar el contenido de humedad, límites de Atterberg y gravedad específica de los sólidos.

- ¿Las atenuaciones en los minerales constituyentes del suelo con tiempos más prolongados de exposición (mayores a una semana) podrían llegar a cambiar su estructura mineralógica, en el caso particular de las micas?
- ¿Cómo se afectan los límites de Atterberg de los suelos arcillosos con los procesos de secado?
- Cuantificar la tasa de infiltración de los hidrocarburos ligeros (por ejemplo, diésel) en los suelos arcillosos.
- Evaluar y comparar el comportamiento geotécnico de los suelos parcialmente saturados y saturados con presencia de diferentes porcentajes de hidrocarburo mayores al 6%.

Bibliografía

- Ahmed, M. (1985, junio). *Clay mineralogy and its role on engineering properties of soil* (Thesis). Bangladesh University, Dhaka. Recuperado a partir de <http://lib.buet.ac.bd:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2793/Full%20%20The%20sis%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Akinwumi, I. I., Diwa, D., & Obianigwe, N. (2014). Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 3(4), 816–824.
- Al-Ani, T., & Sarapää, O. (2008). *CLAY AND CLAY MINERALOGY*. GEOLOGICAL SURVEY OF FINLAND. Recuperado a partir de http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/m19_3232_2008_41.pdf
- Al-Khafaji, A. W., & Andersland, O. B. (1992). *Geotechnical engineering and soil testing*. Recuperado a partir de <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpGEST0002/viewerType:toc/>
- ASTM. (2009). D7263 – 09. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens.
- Barton, C. D., & Karathanasis, A. D. (2002). Clay minerals. *Encyclopedia of soil science*, 187-192.
- Benjuma, P. N., Agudelo, J. R., & Benavidez, A. Y. (2004). Análisis de calidad de los biogasoleos de aceite de palma e higuera. *Energética*, 31, 11-21.
- Berry, P. L., & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelo*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Bian, H., Liu, S., Cai, G., & Chu, Y. (2016). Influence of diesel pollution on the physical properties of soils. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(14), 552-555. <https://doi.org/10.3208/jgssp.CHN-16>

- Brindley, G. W. (1952). Identification of Clay Minerals by X-ray Diffraction Analysis. *Clays and Clay Minerals*, 1, 119-129.
- Brito, O. O., Lema, I. I., & García, A. G. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta ecológica*, (69), 83–92.
- Chow Pangtay, Susana. (1998). *Petroquímica y sociedad*. México. Recuperado a partir de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_9.html
- Contreras, M. ., Escolano, O., Rodríguez, V., Díaz, F. ., Pérez, R., García, S., & García Frutos, F. . (2003). Estudio de adsorción de fenantreno en diferentes tipos de arcillas. *CIEMAT*. Recuperado a partir de http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/115/38115061.pdf
- Correa-Calle, O., García Orozco, F. J., & Escobar García, D. A. (2013). Representación de estados y trayectorias volumétricas y gravimétricas en suelos. *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*, 10(1). Recuperado a partir de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=17944953&AN=95952886&h=eavODHluxOQ0QBJXESZEAsdSrmSz2Mj99v4xebeONiPOs1Rf8%2FnHIOV6aP6x3QFBK3GQZOA69SAHMP2miZSTZg%3D%3D&crI=c>
- Dana, J. D., & Hurlbut, C. S. (1960). *Manual de mineralogía: tratado moderno para la enseñanza en universidades y escuelas especiales y para guía de ingenieros de minas y geólogos*. Barcelona: Reverté.
- Das, B. M., Cera Alonso, J. de la, & Bernal Carreño, I. (2001). *Principios de ingeniería de cimentaciones*. México: International Thomson Editores.

- Das, B. M., & Cera, J. de la. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Learnig.
- Echeverri, O., Valencia González, Y., Toscano-Patiño, D. E., Ordoñez-Muñoz, F. A., Arango-Salas, C., & Osorio-Torres, S. (2015). Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with gasoline. *DYNA*, 82(190), 31-37. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.42161>
- Fernández García, D., Carles Brangari, A., & Freixas Borrell, G. (2004). Guía técnica para la evaluación de la problemática del subsuelo asociada a compuestos organoclorados. Recuperado a partir de <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/26272>
- García García, C. P. (1997). Algunos análisis físico-químicos para la identificación de los minerales componentes de una arcilla. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/8410/1/430740030.1997.pdf>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación* (4a ed). México: McGraw Hill.
- Huaiquilaf, B. C. (2008). Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. *Ciencia, Ahora*, (22). Recuperado a partir de <http://www.academia.edu/download/38509168/03ContaminacionAguasSubterraneas.pdf>
- Huang, F., & Lu, H. (2014). Experiment Study on the Atterberg Limits of Clay Contaminated by Oil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 3037-3046.
- International Symposium on Geoenvironmental Engineering, Chen, Y., Tang, X., & Zhan, L. (2010). *Advances in environmental geotechnics: proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering in Hangzhou, China, September 8-*

- 10, 2009. Berlin; London: Springer. Recuperado a partir de <http://site.ebrary.com/id/10446188>
- INVIAS. (2007). I.N.V.E-128-07. Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral.
- INVIAS. (2013a). I.N.V.E-122-13. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado.
- INVIAS. (2013b). I.N.V.E-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos.
- INVIAS. (2013c). I.N.V.E-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- INVIAS. (2013d). I.N.V.E-127-13. Determinación de los factores de contracción de los suelos.
- INVIAS. (2013e). I.N.V.E-128-13. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.
- INVIAS. (2013f). I.N.V.E-152-13. Compresión inconfiada en muestras de suelo.
- INVIAS. (2013g). I.N.V.E-181-13. Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.
- Izdebska-Mucha, D., & Trzciński, J. (2008). Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *geologija*, 50, 68–74. <https://doi.org/10.2478/V10056-008-0027-0>
- Joseph, J., & Hari, G. (2015). Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4.
- Khamehchiyan, M., Hossein Charkhabi, A., & Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89(3-4), 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.10.009>
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., & Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>

- Leoni, A. J. (s. f.). Capítulo I. Formación de los suelos. Recuperado 23 de octubre de 2016, a partir de http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Cap%C3%ADtulo%201_Propiedades%20Fisicas%20de%20los%20suelos.pdf
- Liu, Z., Liu, S., & Cai, Y. (2015). Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil. *Journal of Central South University*, 22(12), 4837-4843. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3035-3>
- Lizcano, A., Herrera, M., & Santamarina, J. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, 6(2), 167–198.
- Mapa de Infraestructura Petrolera. (2016, marzo 17). Recuperado 17 de marzo de 2016, a partir de http://www.ecopetrol.com.co/especiales/mapa_infraestructura.htm
- Mielenz, R., & King, M. (1952). Physical-chemical properties and engineering performance of clays. *Clays and Clay Minerals*, 1, 196-254.
- Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. New York: Wiley.
- Montoro, M. A. (2011, marzo). *Caracterización y Análisis del Desplazamiento de Fluidos No Miscibles en Medios Porosos* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Recuperado a partir de https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/2558/Tesis_Doctoral_Montoro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Muller, B. (2015). Experimental Interactions Between Clay Minerals and Bacteria: A Review. *Elsevier B.V. and Science Press*, 25, 799-810. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30061-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30061-8)
- N. Yong, R., Nakano, M., & Pusch, R. (2012). *Environmental soil properties and behaviour*. CRC Press.

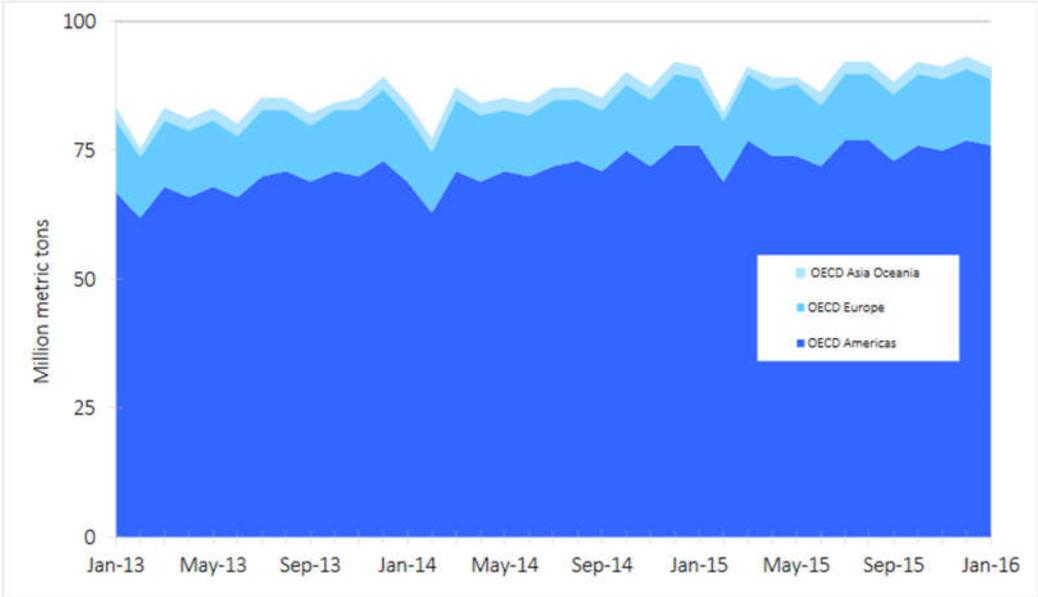
- Nasehi, S. A., Uromeihy, A., Nikudel, M. R., & Morsali, A. (2016). Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), 333-345. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9948-7>
- Newell, C. J., Acree, S. D., Ross, R. R., & Huling, S. G. (2015, junio). Light Nonaqueous Phase Liquids. EPA. Recuperado a partir de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/lnapl.pdf>
- NTC. (2012). NTC-4630. Procedimientos para la determinación de los límites de consistencia.
- Ochepo, J., & Joseph, V. (2014). Effect of oil contamination on lime stabilized soil. *Journal of Civil Engineering*, 8(1), 88–96.
- PANalytical - Emyrean. (2016, septiembre 9). Recuperado 10 de septiembre de 2016, a partir de <http://www.panalytical.es/Emyrean.htm>
- Pandey, A., & Bind, Y. K. (2014). Effects of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Alluvial Soil Naini, Allahabad, 3. Recuperado a partir de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.3892&rep=rep1&type=pdf>
- Ransome Daka, Miebaka. (2015). *Geotechnical properties of oil contaminated soil*. The University of Manchester. Recuperado a partir de <https://www.escholar.manchester.ac.uk/api/datastream?publicationPid=uk-ac-man-scw:262881&datastreamId=FULL-TEXT.PDF>
- Rasheed, Z. N., Ahmed, F. R., & Jassim, H. M. (2014). Effect of crude oil products on the geotechnical properties of soil (Vol. 186, pp. 353-362). *WIT Transactions on Ecology and The Environment*. <https://doi.org/10.2495/ESUS140301>

- Robin, E., & Gervais, S. (2016). *Monthly oil statistics*. International Energy Agency. Recuperado a partir de <http://www.iea.org/media/statistics/surveys/oil/oil.pdf>
- Romero, E. G., & Barrios, M. S. (1998). Las arcillas: propiedades y usos. *Universidad de Castilla-La Mancha*, 25.
- Rosenzweig, W. D., & Stotzky, G. (1979). Influence of environmental factors on antagonism of fungi by bacteria in soil: clay minerals and pH. *Applied and environmental microbiology*, 38(6), 1120–1126.
- Sale, T. (2001, julio). Methods for Determining Inputs to Environmental Petroleum Hydrocarbon Mobility and Recovery Models. API PUBLICATION. Recuperado a partir de <http://www.api.org/Environment-Health-and-Safety/Clean-Water/Ground-Water/~/~~/media/97D9B7561D34477F85D790DC1E3CCDBB.ashx>
- Sánchez San Román, J. (2012, junio). Transporte de contaminantes. Universidad de Salamanca. Recuperado a partir de http://hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf
- Santamarina, C., & Narsilio, G. (2008). Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. *Georgia Institute of Technology*, 790. Recuperado a partir de <http://pmrl.ce.gatech.edu/presentations/Paper%20-%20Venezuela%202008.pdf>
- Serrano Guzmán, M. F., & Torrado Gómez, L. M. (2013a). Compresión inconfiada en muestras de suelos afectados por derrames de hidrocarburo. Tomadao y adaptado de INVE - 152 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F., & Torrado Gómez, L. M. (2013b). Determinación del límite líquido de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo. Tomado y adaptado de INVE - 125 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

- Serrano Guzmán, M. F., & Torrado Gómez, L. M. (2013c). Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo afectado por derrames de hidrocarburo, roca y mezclas de suelo afectado con hidrocarburo - agregado. Tomado y adaptado de INVE - 122 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F., & Torrado Gómez, L. M. (2013d). Límite plástico e índice de plasticidad de suelos afectados con hidrocarburo. Tomado y adaptado de INVE - 126 - 13. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Serrano Guzmán, M. F., Torrado Gómez, L. M., & Pérez Ruiz, D. D. (2013). Impact of Oil Spills on the Mechanical Properties of Sandy Soils. *Revista Científica General José María Córdova*, 11(12), 233–244.
- Solly, G., Aswathy, E., Berlin, S., Krishnaprabha, N., & Maria, G. (2014). Study on Geotechnical Properties of Diesel Oil Contaminated Soil. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 2, 113-117.
- Tianyuan, Z., Junjie, Y., Yongxia, L., & Jiangjiao, L. (2013). Experimental study on engineering properties of diesel contaminated soil. Recuperado a partir de http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GCKC201301002.htm
- Tong, L., Chen, W. S., Zheng, X. L., & Li, M. (2012). Effect of Oil Contamination on Atterberg Limits of Soil. *Advanced Materials Research*, 374-377, 336-338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.336>
- Transporte Indicadores. (2014, noviembre 9). Recuperado 28 de abril de 2016, a partir de <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/transporte/transporte-indicadores>

- Ukpong, E. C., & Umoh, I. C. (2015). Effect of crude oil spillage on geotechnical properties of lateritic soil in Okoroete, Eastern Orobolo, 7. Recuperado a partir de [http://eaas-journal.org/survey/userfiles/files/v7i103%20Civil%20Engineering\(1\).pdf](http://eaas-journal.org/survey/userfiles/files/v7i103%20Civil%20Engineering(1).pdf)
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *Plan energetico nacional colombia: ideario energético 2050*. Colombia: UPME. Recuperado a partir de http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf
- Velde, B. (1995). *Origin and mineralogy of clays*. Berlin; New York: Springer.
- Walia, B. S., Singh, G., & Kaur, M. (2013). Study of diesel contaminated clayey soil. En *Proceedings of Indian Geotechnical Conference* (pp. 22–24). Roorkee, India. Recuperado a partir de http://www.igs.org.in/igc2013/igc_2013_roorkee_proceedings/full_length_paper/14%20Th%20PDF/14%20Th-09.pdf
- Yilmaz, I. (2004). Relationships between liquid limit, cation exchange capacity, and swelling potentials of clayey soils. *Eurasian soil science*, 37(5), 506-512.
- Yukselen, Y., & Kaya, A. (2006). Prediction of cation exchange capacity from soil index properties. *Clay Minerals*, 41(4), 827-837. <https://doi.org/10.1180/0009855064140222>
- Zárate, A. Y. (2014, agosto 4). *Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso* (Thesis). Recuperado a partir de <http://ri.uaq.mx/handle/123456789/1738>
- Zhu, Y., Li, Y., Lu, A., Wang, H., Yang, X., Wang, C., ... Pan, X. (2011). Study of the interaction between bentonite and a strain of *Bacillus mucilaginosus*. *Clays and Clay Minerals*, 59(5), 538-545. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2011.0590511>

Anexo 1. Distribución de los productos del petróleo por continente



Distribución de la producción de petróleo, líquidos del gas natural (NGL) y materias primas refinadas en el mundo. Fuente: (Robin & Gervais, 2016)

Anexo 2. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 0% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			58
Peso recipiente, W1	(g)		11.31
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		40.75
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		31.89
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		8.86
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		20.58
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		43.1

Contenido de humedad

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Datos			
N° recipiente			3
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		165.43
Peso recipiente, W4	(g)		102.70
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		62.73
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.50
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		670.40
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		24.83
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.53
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.53

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV - E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	0		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	C1	19P	C2	C2*	19P*	2	
Peso recipiente, W1 (g)	6.89	4.03	6.66	6.64	4.04	371.97	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	11.78	9.37	8.49	12.86	10.69	394.39	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	9.63	6.94	7.65	10.97	8.69	384.1	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	2.15	2.43	0.84	1.89	2.00	10.29	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.74	2.91	0.99	4.33	4.65	12.13	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	78.5	83.5	84.8	43.6	43.0	84.8
N° golpes, N	34	26	21	-	-	-	
Límite líquido	%	83.28			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	43.3		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	40.0		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.91
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	433.9
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	27.45

Límites de Atterberg a 110 ± 5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla		%Diésel	0	
Datos							
Diámetro (mm)		37.75	37.88	38.03	Prom= 37.89		
Altura (mm)		75.96	76.04	75.83	Prom= 75.94		
Masa (g)		140.51					
Área inicial (mm ²)		1127					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	ε _i	ε _i (%)	Acorr (mm ²)	Δσ _i (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1127	0.0
2	30	0.02	0.43	0.00566	0.57	1134	17.6
3	60	0.03	1.007	0.01326	1.33	1143	26.3
4	90	0.03	1.19	0.01567	1.57	1145	26.2
5	120	0.03	1.22	0.01606	1.61	1146	26.2
6	150	0.03	1.23	0.0162	1.62	1146	26.2
7	180	0.03	1.24	0.01633	1.63	1146	26.2
8	210	0.03	1.26	0.01659	1.66	1146	26.2
9	240	0.05	1.44	0.01896	1.90	1149	43.5
10	270	0.07	1.85	0.02436	2.44	1156	60.6
11	300	0.1	2.42	0.03187	3.19	1164	85.9
12	330	0.13	3.04	0.04003	4.00	1174	110.7
13	360	0.15	3.59	0.04727	4.73	1183	126.8
14	390	0.17	4.16	0.05478	5.48	1193	142.5
15	420	0.18	4.77	0.06281	6.28	1203	149.6
16	450	0.2	5.39	0.07097	7.10	1213	164.8
17	480	0.21	5.58	0.07348	7.35	1217	172.6
18	510	0.22	6.6	0.08691	8.69	1235	178.2
qu (KPa)		178.2					
Cu (KPa)		89.1					
σ ₃ (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 3. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 1% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	47		
Peso recipiente, W1	(g)	7.19	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	34.02	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	26.04	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.98	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	18.85	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	42.3	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	60		
Peso recipiente, W1	(g)	11.23	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	49.84	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	38.17	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	11.67	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	26.94	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	43.3	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			1
Peso recipiente+suelo seco, W3		(g)	264.10
Peso recipiente, W4		(g)	197.70
Peso suelo seco, Ws=W3-W4		(g)	66.40
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1		(g)	632.20
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2		(g)	672.10
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2		(g)	26.50
Temperatura del agua, T1		°C	19.5
Factor de corrección, K			1.0001
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.51
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.51

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			101
Peso recipiente+suelo seco, W3		(g)	282.54
Peso recipiente, W4		(g)	223.70
Peso suelo seco, Ws=W3-W4		(g)	58.84
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1		(g)	677.10
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2		(g)	710.80
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2		(g)	25.14
Temperatura del agua, T1		°C	18.0
Factor de corrección, K			1.00039
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.34
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.34

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS						
INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13						
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	1	
Tiempo secado en horno	24 horas					
Temperatura horno	110 ± 5 °C					
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción
Ensayo	1	2	3	1	2	1
N° recipiente	11P	27	68	9	96	2
Peso recipiente, W1 (g)	4.60	7.09	4.02	7.02	4.03	371.92
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	6.90	9.84	7.38	13.90	10.21	393.95
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	5.82	8.54	5.78	11.85	8.32	383.38
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.08	1.30	1.60	2.05	1.89	10.57
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.22	1.45	1.76	4.83	4.29	11.46
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	88.5	89.7	90.9	42.4	44.1
N° golpes, N	29	23	17	-	-	-
Límite líquido	%	89.3			-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	43.2	
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	46.0	
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.96
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	438.68
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	28.45

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13, INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	1			
Tiempo secado en horno	35-40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	95	B5	74	B3	71	5	
Peso recipiente, W1 (g)	4.29	6.60	11.36	6.69	7.62	231.78	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	7.26	9.51	15.68	13.72	14.43	254.54	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	5.88	8.15	13.63	11.41	12.20	243.65	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.38	1.36	2.05	2.31	2.23	10.89	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.59	1.55	2.27	4.72	4.58	11.87	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	86.8	87.7	90.3	48.9	48.7	91.7
N° golpes, N	29	23	17	-	-	-	
Límite líquido	%	87.7			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	48.8		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	38.9		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	552.01
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	437.23
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	26.54

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	1
Datos							
Diámetro (mm)		37.46		37.32	37.6	Prom= 37.46	
Altura (mm)		78.9		78.65	78.77	Prom= 78.77	
Masa (g)		142.39					
Área inicial (mm ²)		1102					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	ε _i	ε _i (%)	Acorr (mm ²)	Δσ _i (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1102	0.0
2	30	0.02	0.46	0.00584	0.58	1109	18.0
3	60	0.02	0.74	0.00939	0.94	1113	18.0
4	90	0.02	0.78	0.0099	0.99	1113	18.0
5	120	0.02	0.78	0.0099	0.99	1113	18.0
6	150	0.02	0.8	0.01016	1.02	1113	18.0
7	180	0.02	0.81	0.01028	1.03	1114	18.0
8	210	0.03	0.97	0.01231	1.23	1116	26.9
9	240	0.05	1.38	0.01752	1.75	1122	44.6
10	270	0.07	1.96	0.02488	2.49	1130	61.9
11	300	0.1	2.54	0.03224	3.22	1139	87.8
12	330	0.12	3.17	0.04024	4.02	1148	104.5
13	360	0.14	3.74	0.04748	4.75	1157	121.0
14	390	0.16	4.4	0.05586	5.59	1167	137.1
15	420	0.17	4.85	0.06157	6.16	1174	144.8
16	450	0.18	5.68	0.07211	7.21	1188	151.5
17	480	0.19	6.2	0.07871	7.87	1196	158.8
18	510	0.19	6.77	0.08594	8.59	1206	157.6
19	540	0.19	7.3	0.09267	9.27	1215	156.4

qu (KPa)	158.8
Cu (KPa)	79.4
σ ₃ (KPa)	0

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 4. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 3% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			11
Peso recipiente, W1	(g)	7.21	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	41.12	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	30.78	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	10.34	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	23.57	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	43.9	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			C5
Peso recipiente, W1	(g)	6.79	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	32.06	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	24.39	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.67	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	17.60	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	43.6	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			2
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		264.74
Peso recipiente, W4	(g)		198.20
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		66.54
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.40
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		672.00
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		26.94
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.47
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.47

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			R3
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		256.99
Peso recipiente, W4	(g)		196.10
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		60.89
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		659.90
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		694.40
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		26.39
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.31
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.31

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13						
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	3	
Tiempo secado en horno	24 horas					
Temperatura horno	110 ± 5 °C					
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción
Ensayo	1	2	3	1	2	1
N° recipiente	C1	112	B3	57	18	4
Peso recipiente, W1 (g)	6.87	7.25	6.78	4.50	8.48	258.03
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	10.82	10.60	9.96	10.85	15.21	280.19
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	8.99	9.01	8.42	8.92	13.22	269.51
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.83	1.59	1.54	1.93	1.99	10.68
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.12	1.76	1.64	4.42	4.74	11.48
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	86.3	90.3	93.9	43.7	42.0
N° golpes, N	29	23	19	-	-	-
Límite líquido	%	89.2			-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	42.8	-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	46.4	-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	551.92
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	433.14
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	30.19

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	3		
Tiempo secado en horno	35-40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	19	C3	58	96	19	3	
Peso recipiente, W1 (g)	6.91	6.87	11.34	4.00	6.88	256.48	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	10.86	8.66	14.31	10.83	13.24	278.98	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	9.05	7.84	12.89	8.57	11.13	268.22	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.81	0.82	1.42	2.26	2.11	10.76	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.14	0.97	1.55	4.57	4.25	11.74	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	84.6	84.5	91.6	49.5	49.6	91.7
N° golpes, N	29	23	19	-	-	-	
Límite líquido	%	86.0			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	49.6		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	36.5		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	435.89	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	27.85	

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla		%Diésel	3	
Datos							
Diámetro (mm)		37.15		37.86	37.66	Prom= 37.56	
Altura (mm)		76.95		77.35	76.506	Prom= 76.94	
Masa (g)		140.69					
Área inicial (mm ²)		1108					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1108	0.0
2	30	0.02	0.47	0.00611	0.61	1115	17.9
3	60	0.02	0.58	0.00754	0.75	1116	17.9
4	90	0.02	0.6	0.0078	0.78	1117	17.9
5	120	0.02	0.61	0.00793	0.79	1117	17.9
6	150	0.02	0.62	0.00806	0.81	1117	17.9
7	180	0.02	0.62	0.00806	0.81	1117	17.9
8	210	0.07	0.96	0.01248	1.25	1122	62.4
9	240	0.09	1.59	0.02067	2.07	1131	79.6
10	270	0.11	2.05	0.02665	2.66	1138	96.6
11	300	0.14	2.67	0.0347	3.47	1148	122.0
12	330	0.14	3.33	0.04328	4.33	1158	124.4
qu (KPa)		124.4					
Cu (KPa)		62.2					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 5. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo A con 6% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			65
Peso recipiente, W1	(g)	11.05	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	38.42	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	30.02	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	8.40	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	18.97	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	44.3	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			59
Peso recipiente, W1	(g)	11.34	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	33.58	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	26.82	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	6.76	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	15.48	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	43.7	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			R3
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		263.68
Peso recipiente, W4	(g)		197.00
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		66.68
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.70
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		670.70
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		28.68
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.32
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.33

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			R#2
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		289.44
Peso recipiente, W4	(g)		229.60
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		59.84
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		676.90
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		710.20
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		26.54
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.25
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.26

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS							
INV-E - 125 - 13 Suelos con hidrocarburos (Método A); INV - E - 126 -13, INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	6		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	112	B3	19	18	14P	5	
Peso recipiente, W1 (g)	7.22	6.69	6.87	8.45	4.02	231.86	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	9.23	10.53	12.16	15.04	11.12	254.71	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	8.29	8.71	9.63	12.92	8.86	243.66	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.94	1.82	2.53	2.12	2.26	11.05	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.07	2.02	2.76	4.47	4.84	11.80	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	87.9	90.1	91.7	47.4	46.7	93.6
N° golpes, N	32	26	23	-	-	-	
Límite líquido	%	90.7			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	47.1		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	43.6		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.96	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	430	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	32.55	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	6			
Tiempo secado en horno	35-40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	200	53	14P	53	17P	1	
Peso recipiente, W1 (g)	6.76	4.68	4.00	4.69	4.31	267.44	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	9.47	8.85	7.98	11.50	10.67	290.46	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	8.22	6.91	6.12	9.19	8.51	279.56	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.25	1.94	1.86	2.31	2.16	10.90	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.46	2.23	2.12	4.50	4.20	12.12	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	85.6	87.0	87.7	51.3	51.4	89.9
N° golpes, N	32	26	23	-	-	-	
Límite líquido	%	87.3			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	51.4		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	35.9		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.84
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	431.14
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	28.86

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	6
Datos							
Diámetro (mm)		37.78		37.14	37.06	Prom= 37.33	
Altura (mm)		77.33		77.45	77.12	Prom= 77.3	
Masa (g)		140.45					
Área inicial (mm ²)		1094					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	ε _i	ε _i (%)	Acorr (mm ²)	Δσ _i (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1094	0.0
2	30	0.01	0.57	0.00737	0.74	1102	9.1
3	60	0.03	0.92	0.0119	1.19	1107	27.1
4	90	0.03	1	0.01294	1.29	1109	27.1
5	120	0.03	1.01	0.01307	1.31	1109	27.1
6	150	0.03	1.02	0.0132	1.32	1109	27.1
7	180	0.03	1.04	0.01345	1.35	1109	27.0
8	210	0.03	1.08	0.01397	1.40	1110	27.0
9	240	0.05	1.35	0.01746	1.75	1114	44.9
10	270	0.07	1.96	0.02536	2.54	1123	62.3
11	300	0.1	2.51	0.03247	3.25	1131	88.4
12	330	0.13	3.11	0.04023	4.02	1140	114.0
13	360	0.14	3.74	0.04838	4.84	1150	121.7
qu (KPa)		121.7					
Cu (KPa)		60.9					
σ ₃ (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 6. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 0% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			71
Peso recipiente, W1	(g)		11.53
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		41.32
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		34.50
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		6.82
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		22.97
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		29.7

Contenido de humedad

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Datos			
N° recipiente			4
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		163.26
Peso recipiente, W4	(g)		108.07
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		55.19
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		677.00
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		711.00
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		21.19
Temperatura del agua, T1	°C		19.5
Factor de corrección, K			1.0001
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.60
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.60

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	0		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	19P	H1	C2	13	12	2	
Peso recipiente, W1 (g)	4.02	6.64	6.62	7.27	7.17	371.89	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	7.21	9.48	12.37	13.90	14.00	394.2	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	5.72	8.15	9.61	12.15	12.19	383.54	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.49	1.33	2.76	1.75	1.81	10.66	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.70	1.51	2.99	4.88	5.02	11.65	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	87.6	88.1	92.3	35.9	36.1	91.5
N° golpes, N	27	20	15	-	-	-	
Límite líquido	%	87.8			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	36.0		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	51.8		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.61	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	453.78	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	18.97	

Límites de Atterberg a 110 ± 5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	0
Datos							
Diámetro (mm)		37.09		37.07	37.2	Prom= 37.12	
Altura (mm)		78.31		78.71	78.56	Prom= 78.53	
Masa (g)		153.68					
Área inicial (mm ²)		1082					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0	1082	0
2	30	0.01	0.15	0.00191	0.19	1084	9.22
3	60	0.01	0.16	0.00204	0.20	1084	9.22
4	90	0.01	0.16	0.00204	0.20	1084	9.22
5	120	0.01	0.18	0.00229	0.23	1085	9.22
6	150	0.02	0.19	0.00242	0.24	1085	18.4
7	180	0.05	0.59	0.00751	0.75	1090	45.9
8	210	0.1	1.07	0.01363	1.36	1097	91.1
9	240	0.16	1.63	0.02076	2.08	1105	144.8
10	270	0.21	2.21	0.02814	2.81	1114	188.6
11	300	0.24	2.84	0.03617	3.62	1123	213.7
12	330	0.25	3.56	0.04533	4.53	1134	220.5
13	360	0.26	4.19	0.05336	5.34	1143	227.4
qu (KPa)		227.4					
Cu (KPa)		113.7					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 7. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 1% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			59
Peso recipiente, W1	(g)		11.33
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		50.03
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		41.38
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		8.65
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		30.05
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		28.8

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			58
Peso recipiente, W1	(g)		11.29
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		50.32
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		41.27
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		9.05
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		29.98
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		30.2

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13 (Método A)			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			R3
Peso recipiente+suelo seco, W3		(g)	174.38
Peso recipiente, W4		(g)	114.10
Peso suelo seco, $W_s=W3-W4$		(g)	60.28
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1		(g)	676.80
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2		(g)	714.10
Peso del agua, $W_w=(W1+W_s)-W2$		(g)	22.98
Temperatura del agua, T1		°C	19.5
Factor de corrección, K			1.0001
$G_s(T1^{\circ}C)=W_s/W_w$			2.62
$G_s(20^{\circ}C)=G_s(T1^{\circ}C) \times K$			2.62

Gravedad específica de los sólidos a 110 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			#1
Peso recipiente+suelo seco, W3		(g)	265.70
Peso recipiente, W4		(g)	197.10
Peso suelo seco, $W_s=W3-W4$		(g)	68.60
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1		(g)	676.80
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2		(g)	718.40
Peso del agua, $W_w=(W1+W_s)-W2$		(g)	27.00
Temperatura del agua, T1		°C	19.0
Factor de corrección, K			1.0002
$G_s(T1^{\circ}C)=W_s/W_w$			2.54
$G_s(20^{\circ}C)=G_s(T1^{\circ}C) \times K$			2.54

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	1		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	9	25	27	H2	25	2	
Peso recipiente, W1 (g)	7.01	6.99	7.07	6.84	6.94	371.87	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	9.37	9.69	8.82	13.07	13.72	394.98	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	8.26	8.41	7.99	11.64	12.07	383.53	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.11	1.28	0.83	1.43	1.65	11.45	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.25	1.42	0.92	4.80	5.13	11.66	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	88.8	90.1	90.2	29.8	32.2	98.2
N° golpes, N	35	24	21	-	-	-	
Límite líquido	%	89.9			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	31.0		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	58.9		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	552.04
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	455.55
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	24.88

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	1		
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	14	112	H2	9	27	4	
Peso recipiente, W1 (g)	8.15	7.21	6.81	7.03	7.09	257.98	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	12.08	10.64	10.89	13.57	13.26	280.69	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	10.28	9.05	8.98	11.97	11.78	269.82	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.80	1.59	1.91	1.60	1.48	10.87	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.13	1.84	2.17	4.94	4.69	11.84	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	84.5	86.4	88.0	32.4	31.6	91.8
N° golpes, N	34	26	22	-	-	-	
Límite líquido	%	87.0		-	-	-	
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	32.0		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	55.0		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	552.03
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	457.06
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	16.04

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	1
Datos							
Diámetro (mm)		37.47		37.26	37.49	Prom= 37.41	
Altura (mm)		76.36		76.49	76.2	Prom= 76.35	
Masa (g)		150.89					
Área inicial (mm ²)		1099					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0	1099	0
2	30	0.01	0.03	0.00039	0.039	1099	9.10
3	60	0.01	0.03	0.00039	0.039	1099	9.10
4	90	0.01	0.04	0.00052	0.052	1100	9.10
5	120	0.01	0.05	0.00065	0.065	1100	9.09
6	150	0.02	0.07	0.00092	0.092	1100	18.2
7	180	0.05	0.39	0.00511	0.51	1105	45.3
8	210	0.1	0.88	0.01153	1.15	1112	89.9
9	240	0.15	1.35	0.01768	1.77	1119	134.1
10	270	0.19	1.98	0.02593	2.59	1128	168.4
11	300	0.22	2.52	0.03301	3.30	1136	193.6
12	330	0.24	3.08	0.04034	4.03	1145	209.6
13	360	0.26	3.62	0.04741	4.74	1154	225.4
14	390	0.27	4.3	0.05632	5.63	1165	231.8
15	420	0.27	4.75	0.06221	6.22	1172	232.1
qu (KPa)		232.1					
Cu (KPa)		116.0					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 8. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 3% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	60		
Peso recipiente, W1	(g)	11.22	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	42.16	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	34.97	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.19	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	23.75	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	30.3	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	19P		
Peso recipiente, W1	(g)	4.04	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	35.94	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	28.49	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.45	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	24.45	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	30.5	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			5
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		171.54
Peso recipiente, W4	(g)		111.01
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		60.53
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		677.10
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		714.30
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		23.33
Temperatura del agua, T1	°C		19.5
Factor de corrección, K			1.0001
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.59
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.59

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			#1
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		253.45
Peso recipiente, W4	(g)		196.80
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		56.65
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		677.00
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		711.10
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		22.55
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.51
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.51

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	3			
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	70	9	C1	11	H2	5	
Peso recipiente, W1 (g)	11.26	7.54	6.81	7.21	6.82	231.81	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	13.87	8.95	8.69	13.47	13.32	255.34	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	12.69	8.31	7.84	11.86	11.63	244.59	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.18	0.64	0.85	1.61	1.69	10.75	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.43	0.77	1.03	4.65	4.81	12.78	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	82.5	83.1	82.5	34.6	35.1	84.1
N° golpes, N	32	22	18	-	-	-	
Límite líquido	%	82.7			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	34.9		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	47.8		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.93
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	443.28
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	20.02

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	3			
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	A3	57	74	95	11P	1	
Peso recipiente, W1 (g)	9.55	11.04	11.33	4.29	4.61	267.44	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	11.22	13.52	14.47	11.09	11.18	291.05	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	10.50	12.41	13.06	9.41	9.57	280.47	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.72	1.11	1.41	1.68	1.61	10.58	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	0.95	1.37	1.73	5.12	4.96	13.03	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	75.8	81.0	81.5	32.8	32.5	81.2
N° golpes, N	31	21	17	-	-	-	
Límite líquido	%	78.6			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	32.6		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	45.9		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.83
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	445.62
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	16.18

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	3
Datos							
Diámetro (mm)		37.69	38.04	37.62	Prom= 37.783		
Altura (mm)		79.81	79.43	79.44	Prom= 79.56		
Masa (g)		152.78					
Área inicial (mm ²)		1121					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1121	0.0
2	30	0.02	0.2	0.00251	0.25	1124	17.8
3	60	0.02	0.22	0.00277	0.28	1124	17.8
4	90	0.02	0.22	0.00277	0.28	1124	17.8
5	120	0.02	0.23	0.00289	0.29	1124	17.8
6	150	0.02	0.23	0.00289	0.29	1124	17.8
7	180	0.04	0.27	0.00339	0.34	1125	35.6
8	210	0.11	0.77	0.00968	0.97	1132	97.2
9	240	0.17	1.35	0.01697	1.70	1141	149.0
10	270	0.21	1.96	0.02464	2.46	1150	182.7
11	300	0.23	2.57	0.0323	3.23	1159	198.5
12	330	0.24	3.08	0.03871	3.87	1166	205.8
qu (KPa)		205.8					
Cu (KPa)		102.9					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 9. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo B con 6% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	C5		
Peso recipiente, W1	(g)	6.77	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	32.94	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	26.77	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	6.17	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	20.00	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	30.9	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	65		
Peso recipiente, W1	(g)	11.04	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	45.46	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	37.37	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	8.09	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	26.33	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	30.7	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			20
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		171.64
Peso recipiente, W4	(g)		112.91
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		58.73
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.50
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		668.00
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		23.23
Temperatura del agua, T1	°C		20.0
Factor de corrección, K			1
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.53
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.53

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			#2
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		258.15
Peso recipiente, W4	(g)		197.10
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		61.05
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		660.20
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		696.50
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		24.75
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.47
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.47

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	6			
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	58	C3	60	25	67	3	
Peso recipiente, W1 (g)	11.28	6.79	11.20	6.96	11.32	256.47	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	15.17	9.48	16.47	13.86	17.57	279.42	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	13.40	8.25	14.03	12.09	15.95	268.82	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.77	1.23	2.44	1.77	1.62	10.60	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.12	1.46	2.83	5.13	4.63	12.35	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	83.5	84.2	86.2	34.5	35.0	85.8
N° golpes, N	30	24	20	-	-	-	
Límite líquido	%	84.6			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	34.7		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	49.8		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.96
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	446.26
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	18.95

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	6			
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	94	17P	64	B5	68	4	
Peso recipiente, W1 (g)	3.76	4.31	4.10	6.60	4.02	257.87	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	8.39	8.92	9.65	13.08	11.17	280.23	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	6.33	6.85	7.14	11.49	9.45	270.13	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	2.06	2.07	2.51	1.59	1.72	10.10	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.57	2.54	3.04	4.89	5.43	12.26	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	80.2	81.5	82.6	32.5	31.7	82.4
N° golpes, N	29	24	19	-	-	-	
Límite líquido	%	81.2			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	32.1		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	49.1		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.98	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	448.38	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	14.40	

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla		%Diésel	6	
Datos							
Diámetro (mm)		37.64		37.5	37.65	Prom= 37.60	
Altura (mm)		77.45		77.48	77.97	Prom= 77.63	
Masa (g)		150.93					
Área inicial (mm ²)		1110					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	ε _i	ε _i (%)	Acorr (mm ²)	Δσ _i (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1110	0.0
2	30	0.02	0.31	0.00399	0.40	1115	17.9
3	60	0.02	0.34	0.00438	0.44	1115	17.9
4	90	0.02	0.35	0.00451	0.45	1115	17.9
5	120	0.02	0.35	0.00451	0.45	1115	17.9
6	150	0.02	0.36	0.00464	0.46	1115	17.9
7	180	0.03	0.39	0.00502	0.50	1116	26.9
8	210	0.07	0.93	0.01198	1.20	1124	62.3
9	240	0.12	1.58	0.02035	2.04	1133	105.9
10	270	0.17	2.27	0.02924	2.92	1144	148.7
11	300	0.2	2.89	0.03723	3.72	1153	173.4
12	330	0.21	3.59	0.04624	4.62	1164	180.4
13	360	0.21	4.06	0.0523	5.23	1171	179.3
qu (KPa)		180.4					
Cu (KPa)		90.2					
σ ₃ (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 10. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 0% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	57		
Peso recipiente, W1	(g)	11.03	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	35.69	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	29.96	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	5.73	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	18.93	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	30.3	

Contenido de humedad

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Datos			
N° recipiente	Rect		
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	259.74	
Peso recipiente, W4	(g)	197.70	
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)	62.04	
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)	632.40	
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)	671.40	
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)	23.04	
Temperatura del agua, T1	°C	21.0	
Factor de corrección, K	0.99979		
Gs (T1°C)= Ws/Ww	2.69		
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K	2.69		

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0				
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	H2	27	14	59	71	1	
Peso recipiente, W1 (g)	6.77	7.04	8.12	11.32	11.57	267.43	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	12.47	12.95	13.95	18.14	17.89	293.15	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	10.37	10.74	11.71	16.58	16.44	283.08	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	2.10	2.21	2.24	1.56	1.45	10.07	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	3.60	3.70	3.59	5.26	4.87	15.65	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	58.3	59.7	62.4	29.7	29.8	64.3
N° golpes, N	28	22	17	-	-	-	
Límite líquido	%	59.2			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	29.7		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	29.5		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552.02	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	416.75	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	23.92	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	0
Datos							
Diámetro (mm)		38.2		37.67	37.65	Prom= 37.84	
Altura (mm)		77.17		78	78.22	Prom= 77.80	
Masa (g)		150.92					
Área inicial (mm ²)		1125					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	ε _i	ε _i (%)	Acorr (mm ²)	Δσ _i (KPa)
1	0	0.00	0	0	0.00	1125	0.0
2	30	0.06	0.57	0.00733	0.73	1133	51.6
3	60	0.06	0.74	0.00951	0.95	1135	51.4
4	90	0.06	0.74	0.00951	0.95	1135	51.4
5	120	0.06	0.76	0.00977	0.98	1136	51.4
6	150	0.06	0.76	0.00977	0.98	1136	51.4
7	180	0.06	0.77	0.0099	0.99	1136	55.3
8	210	0.11	1.19	0.0153	1.53	1142	94.0
9	240	0.15	1.76	0.02262	2.26	1151	132.1
10	270	0.21	2.23	0.02866	2.87	1158	180.0
11	300	0.27	2.77	0.03561	3.56	1166	229.6
12	330	0.29	2.89	0.03715	3.71	1168	249.6
13	360	0.35	3.48	0.04473	4.47	1177	298.1
14	390	0.43	5.01	0.0644	6.44	1202	353.7
15	420	0.43	5.81	0.07468	7.47	1215	357.1
16	450	0.44	6.29	0.08085	8.09	1224	355.5
17	480	0.44	6.83	0.08779	8.78	1233	352.9
qu (KPa)		357.1					
Cu (KPa)		178.6					
σ ₃ (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 11. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 1% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			54
Peso recipiente, W1	(g)		10.64
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		43.29
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		35.63
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		7.66
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		24.99
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		30.7

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			47
Peso recipiente, W1	(g)		7.21
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		36.06
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		29.90
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		6.16
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		22.69
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		27.1

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			Rect
Peso recipiente+suelo seco, W3		(g)	267.16
Peso recipiente, W4		(g)	198.20
Peso suelo seco, Ws=W3-W4		(g)	68.96
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1		(g)	632.70
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2		(g)	675.50
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2		(g)	26.16
Temperatura del agua, T1		°C	21.5
Factor de corrección, K			0.99968
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.64
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.64

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			#3
Peso recipiente+suelo seco, W3		(g)	263.07
Peso recipiente, W4		(g)	196.60
Peso suelo seco, Ws=W3-W4		(g)	66.47
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1		(g)	676.80
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2		(g)	717.00
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2		(g)	26.27
Temperatura del agua, T1		°C	19.5
Factor de corrección, K			1.0001
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.53
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.53

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	1		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	67	21	c1	12	54	2	
Peso recipiente, W1 (g)	11.29	7.32	6.81	7.16	10.65	371.89	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	15.20	10.33	11.18	13.71	17.26	396.06	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	13.76	9.21	9.49	12.25	15.79	386.65	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.44	1.12	1.69	1.46	1.47	9.41	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.47	1.89	2.68	5.09	5.14	14.76	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	58.3	59.3	63.1	28.7	28.6	63.8
N° golpes, N	32	26	20	-	-	-	
Límite líquido	%	59.9			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	28.6		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	31.3		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552.15	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	421.06	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	23.13	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	1		
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	58	A3	70	200	14	4	
Peso recipiente, W1 (g)	11.27	9.58	11.28	6.75	8.07	257.95	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	14.84	14.64	15.80	13.01	14.97	282.76	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	13.65	12.83	14.13	11.56	13.38	273.95	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.19	1.81	1.67	1.45	1.59	8.81	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.38	3.25	2.85	4.81	5.31	16.00	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	50.0	55.7	58.6	30.1	29.9	55.1
N° golpes, N	31	26	19	-	-	-	
Límite líquido	%	55.00			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	30.0		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	25.0		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.78
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	411.72
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	19.79

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla	%Diésel	1		
Datos							
Diámetro (mm)		37.49	38.15	37.75	Prom= 37.80		
Altura (mm)		73.84	73.62	73.59	Prom= 73.68		
Masa (g)		149.78					
Área inicial (mm ²)		1122					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1122	0.0
2	30	0.02	0.35	0.00475	0.48	1127	17.7
3	60	0.02	0.36	0.00489	0.49	1128	17.7
4	90	0.02	0.38	0.00516	0.52	1128	17.7
5	120	0.02	0.39	0.00529	0.53	1128	17.7
6	150	0.02	0.41	0.00556	0.56	1128	17.7
7	180	0.04	0.54	0.00733	0.73	1130	35.4
8	210	0.08	0.88	0.01194	1.19	1136	70.4
9	240	0.16	1.39	0.01886	1.89	1144	139.9
10	270	0.23	1.88	0.02551	2.55	1151	199.8
11	300	0.29	2.39	0.03244	3.24	1160	250.1
12	330	0.33	2.93	0.03976	3.98	1168	282.4
13	360	0.35	3.47	0.04709	4.71	1177	297.2
14	390	0.37	3.97	0.05388	5.39	1186	312.0
qu (KPa)		312.0					
Cu (KPa)		156					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 12. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 3% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	24horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			21
Peso recipiente, W1	(g)		7.33
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		39.06
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		31.39
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		7.67
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		24.06
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		31.9

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			11
Peso recipiente, W1	(g)		7.21
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)		35.13
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		28.96
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)		6.17
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)		21.75
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%		28.4

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			#1
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		267.33
Peso recipiente, W4	(g)		197.10
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		70.23
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.50
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		675.20
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		27.53
Temperatura del agua, T1	°C		21.5
Factor de corrección, K			0.99968
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.55
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.55

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			R#1
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		258.22
Peso recipiente, W4	(g)		196.80
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		61.42
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		659.90
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		695.60
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		25.72
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.39
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.39

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	3		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	19P	C2	25	C1	112	5	
Peso recipiente, W1 (g)	4.00	6.63	6.99	6.85	7.22	231.82	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	7.53	10.90	11.88	13.98	13.99	256.28	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	6.19	9.23	9.92	12.32	12.44	246.56	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.34	1.67	1.96	1.66	1.55	9.72	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.19	2.60	2.93	5.47	5.22	14.74	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	61.2	64.2	66.9	30.3	29.7	65.9
N° golpes, N	32	27	18	-	-	-	
Límite líquido	%	64.82			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	30.0		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	34.8		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	419.33	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	22.40	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	3			
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	60	11	68	27	68	1	
Peso recipiente, W1 (g)	11.19	9.48	4.00	7.09	4.01	267.2	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	16.46	14.10	8.39	13.82	10.58	292.19	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	14.57	12.39	6.74	12.30	9.07	282.97	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.89	1.71	1.65	1.52	1.51	9.22	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	3.38	2.91	2.74	5.21	5.06	15.77	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	55.9	58.8	60.2	29.2	29.8	58.5
N° golpes, N	33	27	18	-	-	-	
Límite líquido	%	58.58			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	29.5		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	29.1		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.74
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	412.97
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	19.98

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla		%Diésel	3	
Datos							
Diámetro (mm)		37.87		38.31	38.79	Prom= 38.32	
Altura (mm)		77.53		77.94	77.48	Prom= 77.65	
Masa (g)		152.51					
Área inicial (mm ²)		1153.5					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0.00	1153	0.0
2	30	0.05	0.58	0.00747	0.75	1162	41.3
3	60	0.05	0.66	0.0085	0.85	1163	41.3
4	90	0.05	0.68	0.00876	0.88	1164	41.3
5	120	0.05	0.69	0.00889	0.89	1164	41.3
6	150	0.05	0.69	0.00889	0.89	1164	41.3
7	180	0.05	0.73	0.0094	0.94	1164	46.3
8	210	0.08	1.16	0.01494	1.49	1171	68.9
9	240	0.1	1.61	0.02073	2.07	1178	84.9
10	270	0.17	2.19	0.0282	2.82	1187	143.2
11	300	0.25	2.74	0.03529	3.53	1196	209.1
12	330	0.29	3.31	0.04263	4.26	1205	240.7
13	360	0.3	3.87	0.04984	4.98	1214	247.1
qu (KPa)		247.1					
Cu (KPa)		123.6					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 13. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo C con 6% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	14		
Peso recipiente, W1	(g)	7.30	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	41.15	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	32.87	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	8.28	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	25.57	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	32.4	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	13		
Peso recipiente, W1	(g)	7.29	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	34.43	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	28.40	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	6.03	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	21.11	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	28.6	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			6
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		187.46
Peso recipiente, W4	(g)		115.90
Peso suelo seco, $W_s=W3-W4$	(g)		71.56
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.40
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		669.80
Peso del agua, $W_w= (W1+W_s)-W2$	(g)		34.16
Temperatura del agua, T1	°C		21.0
Factor de corrección, K			0.99979
$G_s (T1^{\circ}C)= W_s/W_w$			2.09
$G_s (20^{\circ}C)= G_s (T1^{\circ}C) \times K$			2.09

Gravedad específica de los sólidos a $110 \pm 5^{\circ}C$

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			101
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		287.59
Peso recipiente, W4	(g)		224.10
Peso suelo seco, $W_s=W3-W4$	(g)		63.49
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		659.80
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		696.60
Peso del agua, $W_w= (W1+W_s)-W2$	(g)		26.69
Temperatura del agua, T1	°C		19.0
Factor de corrección, K			1.0002
$G_s (T1^{\circ}C)= W_s/W_w$			2.38
$G_s (20^{\circ}C)= G_s (T1^{\circ}C) \times K$			2.38

Gravedad específica de los sólidos a $60^{\circ}C$

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV - E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	6			
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	112	3	17	11P	B3	4	
Peso recipiente, W1 (g)	7.17	7.20	7.12	4.61	6.71	257.95	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	9.98	11.09	10.62	11.06	12.98	282.01	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	8.89	9.52	9.19	9.52	11.50	272.125	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.09	1.57	1.43	1.54	1.48	9.88	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.72	2.32	2.07	4.91	4.79	14.18	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	63.4	67.7	69.1	31.4	30.9	69.7
N° golpes, N	27	22	16	-	-	-	
Límite líquido	%	65.0			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	31.1		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	33.9		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552.05	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	426.57	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	22.33	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	6		
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	19P	25	71	47	13	2	
Peso recipiente, W1 (g)	4.03	7.01	11.49	7.19	7.27	371.88	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	6.98	10.52	15.37	13.44	13.65	395.08	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	5.86	9.15	13.85	11.97	12.14	385.72	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	1.12	1.37	1.52	1.47	1.51	9.36	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.83	2.14	2.36	4.78	4.87	13.84	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	61.2	64.0	64.4	30.8	31.0	67.6
N° golpes, N	28	21	16	-	-	-	
Límite líquido	%	62.3		-	-	-	
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	30.9	-	
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	31.4	-	
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.58	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	417.36	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	25.98	

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla		%Diésel	6	
Datos							
Diámetro (mm)		38.19	38.25	38.36	Prom= 38.27		
Altura (mm)		73.13	74.79	75.44	Prom= 74.45		
Masa (g)		150.94					
Área inicial (mm ²)		1150					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0	1150	0.0
2	30	0.03	0.03	0.0004	0.04	1151	28.8
3	60	0.03	0.04	0.00054	0.05	1151	28.8
4	90	0.03	0.05	0.00067	0.07	1151	28.8
5	120	0.03	0.05	0.00067	0.07	1151	28.8
6	150	0.06	0.3	0.00403	0.40	1155	51.9
7	180	0.11	0.72	0.00967	0.97	1161	92.5
8	210	0.16	1.32	0.01773	1.77	1171	134.8
9	240	0.18	1.53	0.02055	2.05	1174	153.3
10	270	0.21	2.09	0.02807	2.81	1183	177.5
11	300	0.24	3.61	0.04849	4.85	1209	199.4
qu (KPa)		199.4					
Cu (KPa)		99.7					
σ3 (KPa)		0					

Anexo 14. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 0% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente	11		
Peso recipiente, W1	(g)	7.21	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	171.30	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	157.10	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	14.20	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	149.89	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	9.5	

Contenido de humedad

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	0
Datos			
N° recipiente	5		
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	179.75	
Peso recipiente, W4	(g)	111.40	
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)	68.35	
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)	632.50	
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)	675.60	
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)	25.25	
Temperatura del agua, T1	°C	19.5	
Factor de corrección, K	1.0001		
Gs (T1°C)= Ws/Ww	2.71		
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K	2.71		

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	0		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	14	66	C1	21	68	4	
Peso recipiente, W1 (g)	8.13	4.06	6.86	7.34	4.03	257.96	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	11.37	6.06	10.62	13.92	10.94	288.53	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	10.74	5.67	9.88	13.14	10.12	282.47	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.63	0.39	0.74	0.78	0.82	6.06	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.61	1.61	3.02	5.80	6.09	24.51	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	24.1	24.2	24.5	13.4	13.5	24.7
N° golpes, N	32	29	24	-	-	-	
Límite líquido	%	24.4		-	-	-	
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	13.5		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	11.0		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	552.08	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	387.72	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	9.02	

Límites de Atterberg a 110 ± 5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA							
INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	0
Datos							
Diámetro (mm)		37.15	37.23	37.25	Prom= 37.21		
Altura (mm)		72.88	72.66	73.35	Prom= 72.96		
Masa (g)		172.06					
Área inicial (mm ²)		1087					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	ε _i	ε _i (%)	Acorr (mm ²)	Δσ _i (KPa)
1	0	0	0	0	0	1087	0.0
2	30	0.01	0.43	0.00589	0.59	1094	9.1
3	60	0.03	0.74	0.01014	1.01	1099	27.3
4	90	0.03	0.74	0.01014	1.01	1099	27.3
5	120	0.03	0.74	0.01014	1.01	1099	27.3
6	150	0.03	0.76	0.01042	1.04	1099	27.3
7	180	0.04	0.81	0.0111	1.11	1100	36.4
8	210	0.07	1.12	0.01535	1.53	1104	63.4
9	240	0.12	1.58	0.02165	2.16	1112	108.0
10	270	0.21	2.13	0.02919	2.92	1120	187.5
11	300	0.27	2.75	0.03769	3.77	1130	238.9
12	330	0.28	3.05	0.0418	4.18	1135	246.7
qu (KPa)		246.72					
Cu (KPa)		123.36					
σ ₃ (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 15. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 1% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			60
Peso recipiente, W1	(g)	11.24	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	80.02	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	74.20	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	5.82	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	62.96	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	9.2	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			11
Peso recipiente, W1	(g)	9.56	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	109.02	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	101.61	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.41	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	92.05	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	8.0	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			007
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		181.81
Peso recipiente, W4	(g)		113.00
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		68.81
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.60
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		675.50
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		25.91
Temperatura del agua, T1	°C		19.5
Factor de corrección, K			1.0001
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.66
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.66

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs)			
INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	1
Datos			
N° recipiente			R3
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		269.55
Peso recipiente, W4	(g)		196.30
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		73.25
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		676.70
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		722.80
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		27.15
Temperatura del agua, T1	°C		19.5
Factor de corrección, K			1.0001
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.70
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.70

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	1		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	54	112	12	67	25	1	
Peso recipiente, W1 (g)	10.64	7.22	7.17	11.32	6.97	267.41	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	13.13	9.49	9.33	17.75	13.62	299.22	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	12.67	9.05	8.90	16.98	12.79	292.66	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.46	0.44	0.43	0.77	0.83	6.56	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.03	1.83	1.73	5.66	5.82	25.25	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	22.7	24.0	24.9	13.6	14.3	26.0
N° golpes, N	34	24	22	-	-	-	
Límite líquido	%	24.1			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	13.9		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	10.2		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	380.32	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	11.56	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	1			
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	A3	57	19P	60	58	2	
Peso recipiente, W1 (g)	9.67	11.03	4.03	11.20	11.29	371.81	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	12.23	13.15	6.05	17.98	18.53	402.08	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	11.72	12.75	5.65	17.17	17.68	395.95	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.51	0.40	0.40	0.81	0.85	6.13	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.05	1.72	1.62	5.97	6.39	24.14	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	24.9	23.3	24.7	13.6	13.3	25.4
N° golpes, N	34	23	22	-	-	-	
Límite líquido	%	24.2			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	13.4		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	10.7		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.88
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	386.45
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	11.06

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	1
Datos							
Diámetro (mm)		37.93		37.24	37.56	Prom= 37.58	
Altura (mm)		73.5		74.5	74.38	Prom= 74.13	
Masa (g)		172.35					
Área inicial (mm ²)		1109					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0	1109	0
2	30	0.02	0.03	0.0004	0.040	1109	18.0
3	60	0.02	0.03	0.0004	0.040	1109	18.0
4	90	0.02	0.03	0.0004	0.040	1109	18.0
5	120	0.02	0.03	0.0004	0.040	1109	18.0
6	150	0.03	0.04	0.00054	0.054	1110	22.5
7	180	0.03	0.53	0.00715	0.715	1117	26.9
8	210	0.09	1	0.01349	1.35	1124	80.1
9	240	0.18	1.62	0.02185	2.18	1134	158.8
10	270	0.22	2.23	0.03008	3.01	1143	192.4
qu (KPa)		192.4					
Cu (KPa)		96.2					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 16. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 3% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			58
Peso recipiente, W1	(g)	11.31	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	92.19	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	84.53	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.66	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	73.22	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	10.5	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			A3
Peso recipiente, W1	(g)	9.62	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	97.77	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	91.12	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	6.65	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	81.50	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	8.2	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 13 (Método A)			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			R3
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		182.50
Peso recipiente, W4	(g)		114.10
Peso suelo seco, $W_s=W3-W4$	(g)		68.40
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.60
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		675.20
Peso del agua, $W_w=(W1+W_s)-W2$	(g)		25.80
Temperatura del agua, T1	°C		20.0
Factor de corrección, K			1
$G_s(T1^{\circ}C)=W_s/W_w$			2.65
$G_s(20^{\circ}C)=G_s(T1^{\circ}C) \times K$			2.65

Gravedad específica de los sólidos a 110 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	3
Datos			
N° recipiente			#2
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		304.48
Peso recipiente, W4	(g)		229.30
Peso suelo seco, $W_s=W3-W4$	(g)		75.18
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		659.80
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		706.50
Peso del agua, $W_w=(W1+W_s)-W2$	(g)		28.48
Temperatura del agua, T1	°C		20.5
Factor de corrección, K			0.9999
$G_s(T1^{\circ}C)=W_s/W_w$			2.64
$G_s(20^{\circ}C)=G_s(T1^{\circ}C) \times K$			2.64

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	3		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	66	72	14	C5	65	4	
Peso recipiente, W1 (g)	4.07	11.05	8.07	6.77	11.02	257.89	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	5.92	13.52	11.33	14.11	17.76	288.03	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	5.54	13.01	10.63	13.18	16.90	281.54	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.38	0.51	0.70	0.93	0.86	6.49	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.47	1.96	2.56	6.41	5.88	23.65	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	25.9	26.0	27.3	14.5	14.6	27.4
N° golpes, N	31	21	18	-	-	-	
Límite líquido	%	26.3			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	14.6		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	11.7		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	(g)	-	-	-	-	-	551.74
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	(g)	-	-	-	-	-	379.59
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	-	13.59

Límites de Atterberg a 110±5 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA						
Descripción del suelo	Arcilla		%Diésel	3		
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas					
Temperatura horno	50 ± 5 °C					
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción
Ensayo	1	2	3	1	2	1
N° recipiente	59	71	112	94	64	3
Peso recipiente, W1 (g)	11.31	11.50	7.20	3.76	4.10	256.45
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	13.01	14.75	9.41	10.00	11.21	286.86
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	12.70	14.11	8.96	9.26	10.35	280.59
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.31	0.64	0.45	0.74	0.86	6.27
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.39	2.61	1.76	5.50	6.25	24.14
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	22.3	24.5	25.6	13.5	13.8	26.0
N° golpes, N	32	21	18	-	-	-
Límite líquido (%)	23.8			-	-	-
Promedio límite plástico, LP (%)	-	-	-	13.6		-
Índice de plasticidad= LL-LP (%)	-	-	-	10.2		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.7
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	386.35
Límite de contracción, LC (%)	-	-	-	-	-	10.00

Límites de Atterberg a 50±5 °C

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	3
Datos							
Diámetro (mm)		37.8	37.7	37.51	Prom= 37.67		
Altura (mm)		73.9	73.8	73.53	Prom= 73.74		
Masa (g)		169.93					
Área inicial (mm ²)		1115					
Velocidad ensayo (mm/min)		1					
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0	1115	0
2	30	0.02	0.47	0.00637	0.64	1122	17.8
3	60	0.02	0.54	0.00732	0.73	1123	17.8
4	90	0.02	0.54	0.00732	0.73	1123	17.8
5	120	0.02	0.55	0.00746	0.75	1123	17.8
6	150	0.02	0.57	0.00773	0.77	1123	17.8
7	180	0.03	0.63	0.00854	0.85	1124	26.7
8	210	0.05	1.17	0.01587	1.59	1132	44.1
9	240	0.1	1.8	0.02441	2.44	1142	87.5
10	270	0.14	2.36	0.032	3.20	1151	121.6
11	300	0.15	2.74	0.03716	3.72	1157	129.6
qu (KPa)		129.6					
Cu (KPa)		64.8					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

Anexo 17. Toma de datos y resultados de laboratorio suelo tipo E con 6% diésel

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	24 horas		
Temperatura horno	110 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			47
Peso recipiente, W1	(g)	7.19	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	79.95	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	72.35	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.60	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	65.16	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	11.7	

Contenido de humedad a 110 ± 5 °C

CONTENIDO DE HUMEDAD INV-E - 122 - 13			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas		
Temperatura horno	50 ± 5 °C		
Datos			
N° recipiente			70
Peso recipiente, W1	(g)	11.28	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2	(g)	106.94	
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)	99.28	
Peso agua, Ww=W2-W3	(g)	7.66	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1	(g)	88.00	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	8.7	

Contenido de humedad a 50 ± 5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 13 (Método A)			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			184
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		254.52
Peso recipiente, W4	(g)		182.20
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		72.32
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		632.70
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		677.20
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		27.82
Temperatura del agua, T1	°C		20.0
Factor de corrección, K			1
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.60
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.60

Gravedad específica de los sólidos a 110±5 °C

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SÓLIDOS (Gs) INV-E - 128 - 07			
Descripción del suelo	Arcilla	%Diésel	6
Datos			
N° recipiente			101
Peso recipiente+suelo seco, W3	(g)		298.09
Peso recipiente, W4	(g)		224.00
Peso suelo seco, Ws=W3-W4	(g)		74.09
Peso picnómetro+agua llena a la marca, W1	(g)		676.80
Peso picnómetro+suelo+agua llena a la marca, W2	(g)		722.60
Peso del agua, Ww= (W1+Ws)-W2	(g)		28.29
Temperatura del agua, T1	°C		20.0
Factor de corrección, K			1
Gs (T1°C)= Ws/Ww			2.62
Gs (20°C)= Gs (T1°C) x K			2.62

Gravedad específica de los sólidos a 60 °C

LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	6		
Tiempo secado en horno	24 horas						
Temperatura horno	110 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	72	59	71	B5	62	3	
Peso recipiente, W1 (g)	11.05	11.32	11.51	6.60	10.89	256.36	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	13.72	13.50	13.86	12.73	17.21	286.37	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	13.19	13.04	13.34	11.92	16.37	279.47	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.53	0.46	0.52	0.81	0.84	6.90	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	2.14	1.72	1.83	5.32	5.48	23.11	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	24.8	26.7	28.4	15.2	15.3	29.9
N° golpes, N	34	29	24	-	-	-	
Límite líquido	%	28.1			-	-	-
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	15.3		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	12.8		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	552.04	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	381.88	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	14.70	

Límites de Atterberg a 110±5 °C

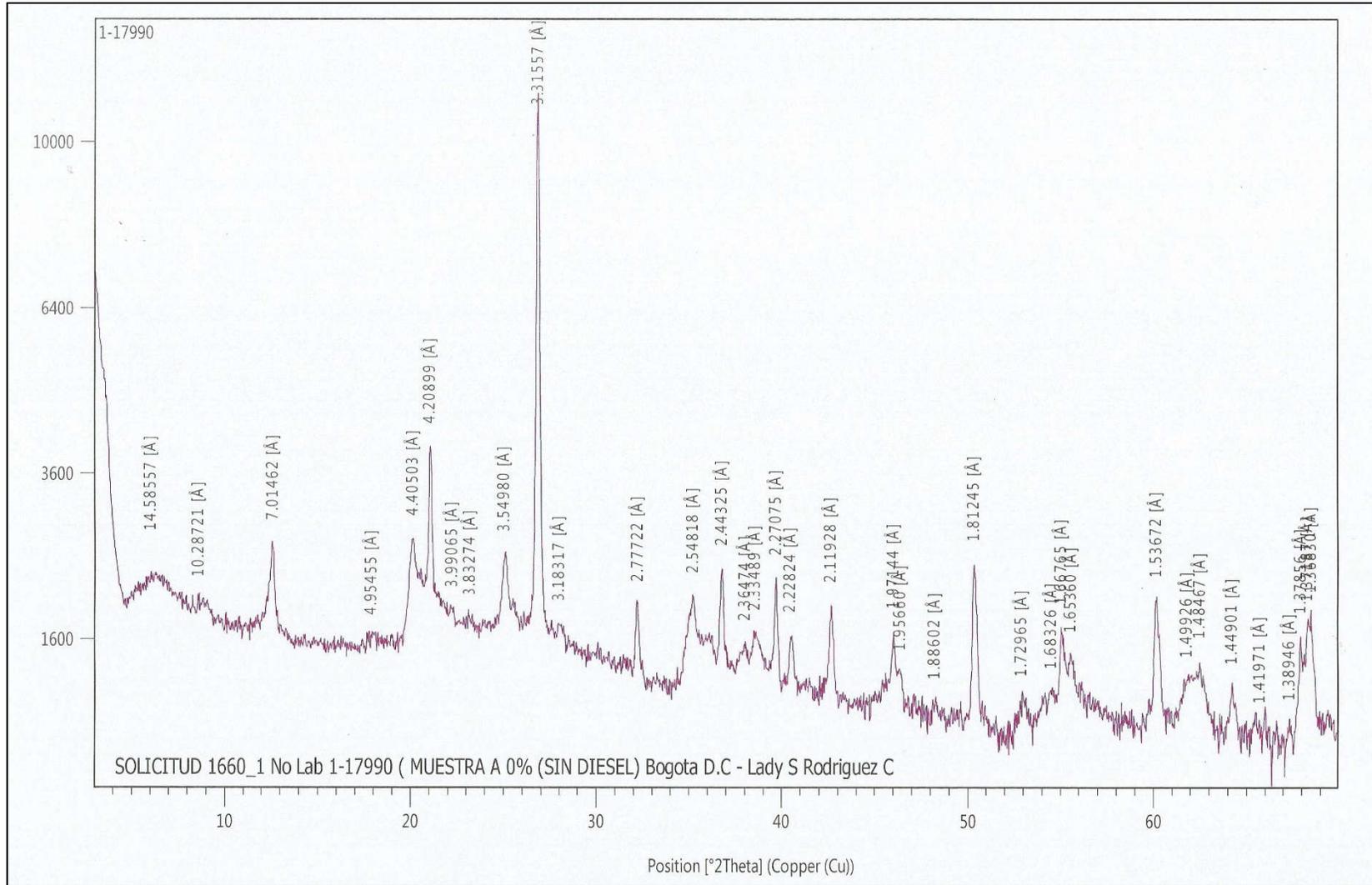
LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS SUELOS INV-E - 125 - 13; INV -E - 126 -13; INV - E 127 -13. ADAPTADA							
Descripción del suelo	Arcilla			%Diésel	6		
Tiempo secado en horno	35 a 40 horas						
Temperatura horno	50 ± 5 °C						
Datos	Límite líquido			Límite plástico		Límite de contracción	
Ensayo	1	2	3	1	2	1	
N° recipiente	H1	C2	70	C3	68	5	
Peso recipiente, W1 (g)	6.64	6.65	11.27	6.79	11.12	231.76	
Peso recipiente+suelo húmedo, W2 (g)	8.32	8.88	14.49	13.54	18.02	261.75	
Peso recipiente+suelo seco, W3 (g)	8.01	8.45	13.82	12.72	17.20	255.54	
Peso agua, Ww=W2-W3 (g)	0.31	0.43	0.67	0.82	0.82	6.21	
Peso partículas sólidas, Ws=W3-W1 (g)	1.37	1.80	2.55	5.93	6.08	23.78	
Contenido de humedad, w(%)= Ww/Ws x 100%	%	22.6	23.9	26.3	13.8	13.5	26.1
N° golpes, N	34	29	23	-	-	-	
Límite líquido	%	25.5		-	-	-	
Promedio límite plástico, LP	%	-	-	-	13.7		-
Índice de plasticidad= LL-LP	%	-	-	-	11.8		-
Peso Hg lleno en el recipiente, W5 (g)	-	-	-	-	-	551.89	
Peso Hg desplazado por pastilla de suelo, W6 (g)	-	-	-	-	-	382.41	
Límite de contracción, LC	%	-	-	-	-	10.55	

Límites de Atterberg a 50±5 °C

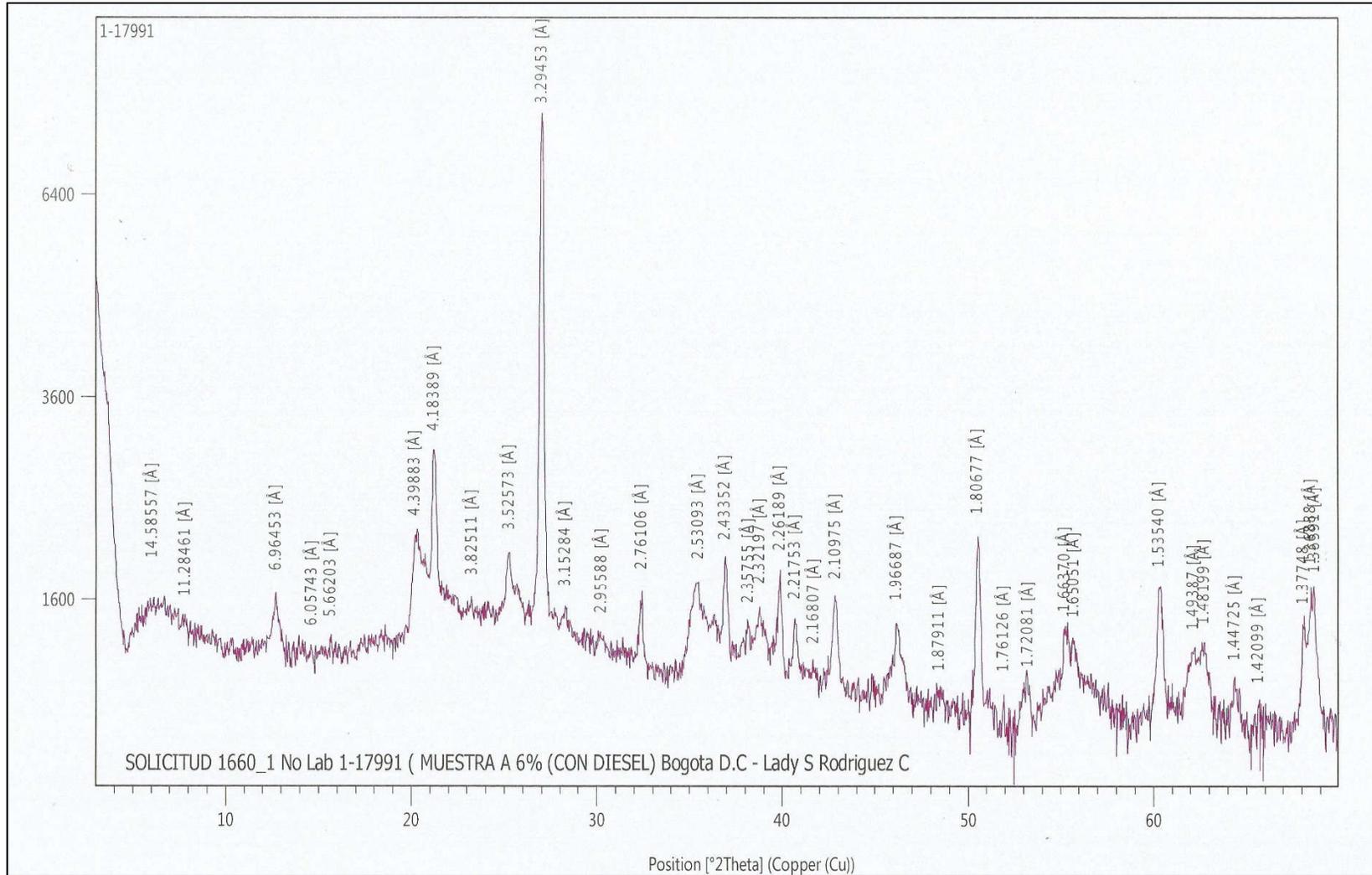
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA INV-E - 152 - 13 (Método A)							
Descripción del suelo			Arcilla			%Diésel	6
Datos							
Diámetro (mm)		36.51	36.74	36.18	Prom= 36.48		
Altura (mm)		72.96	72.04	72.87	Prom= 72.62		
Masa (g)		169.9					
Área inicial (mm ²)		1045					
Velocidad ensayo (mm/min)							
Lectura	Tiempo (s)	Carga (KN)	Deformación (mm)	εi	εi (%)	Acorr (mm ²)	Δσi (KPa)
1	0	0	0	0	0	1045	0
2	30	0.03	0.45	0.0062	0.62	1052	28.5
3	60	0.03	0.46	0.00633	0.63	1052	28.5
4	90	0.03	0.46	0.00633	0.63	1052	28.5
5	120	0.03	0.46	0.00633	0.63	1052	28.5
6	150	0.03	0.47	0.00647	0.65	1052	28.5
7	180	0.04	0.53	0.0073	0.73	1053	38.0
8	210	0.09	0.93	0.01281	1.28	1059	85.0
9	240	0.12	1.58	0.02176	2.18	1068	112.3
qu (KPa)		112.3					
Cu (KPa)		56.2					
σ3 (KPa)		0					

Resistencia a la compresión inconfiada

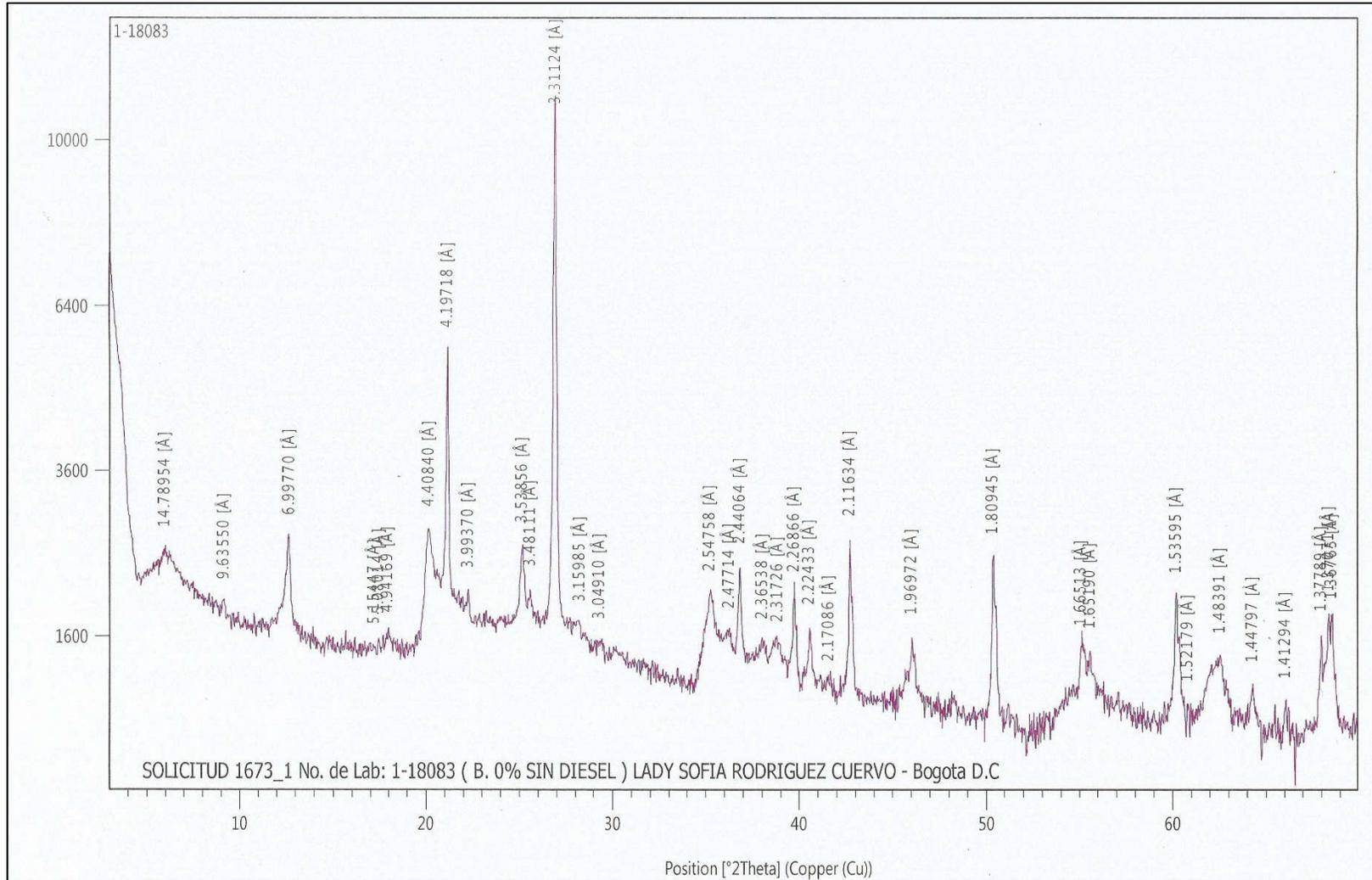
Anexo 18. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo A con 0% de diésel



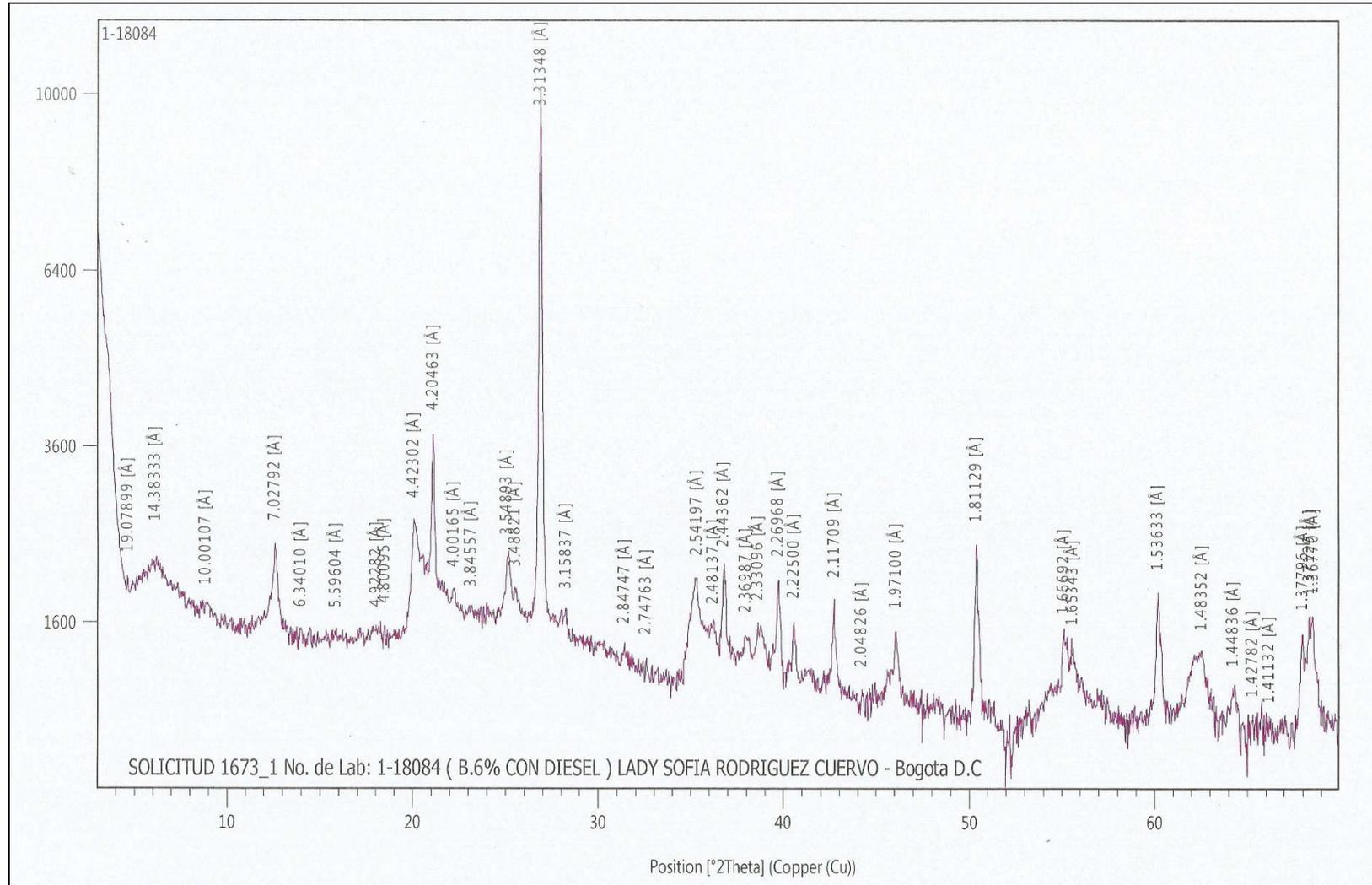
Anexo 19. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo A con 6% de diésel



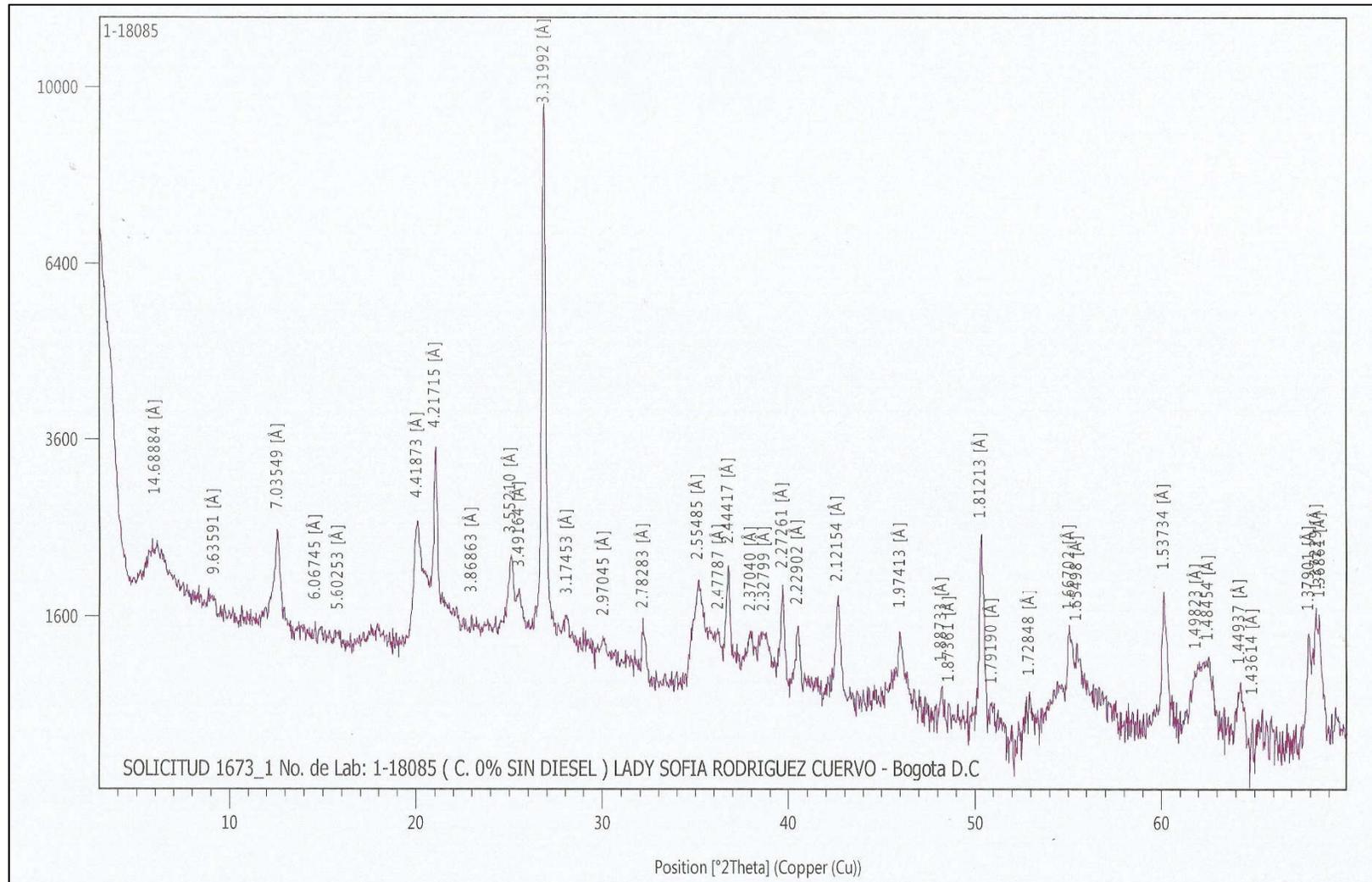
Anexo 20. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo B con 0% de diésel



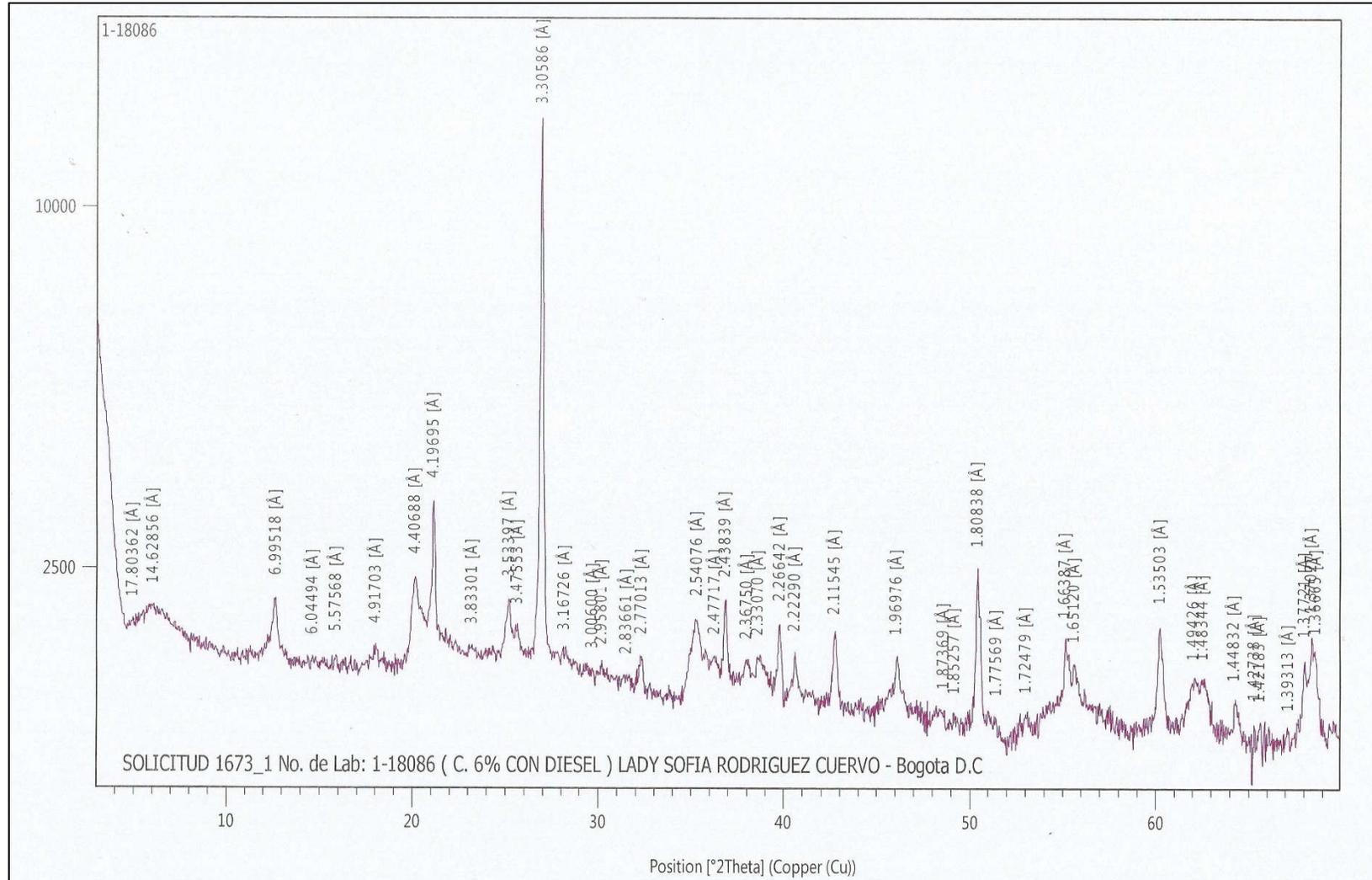
Anexo 21. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo B con 6% de diésel



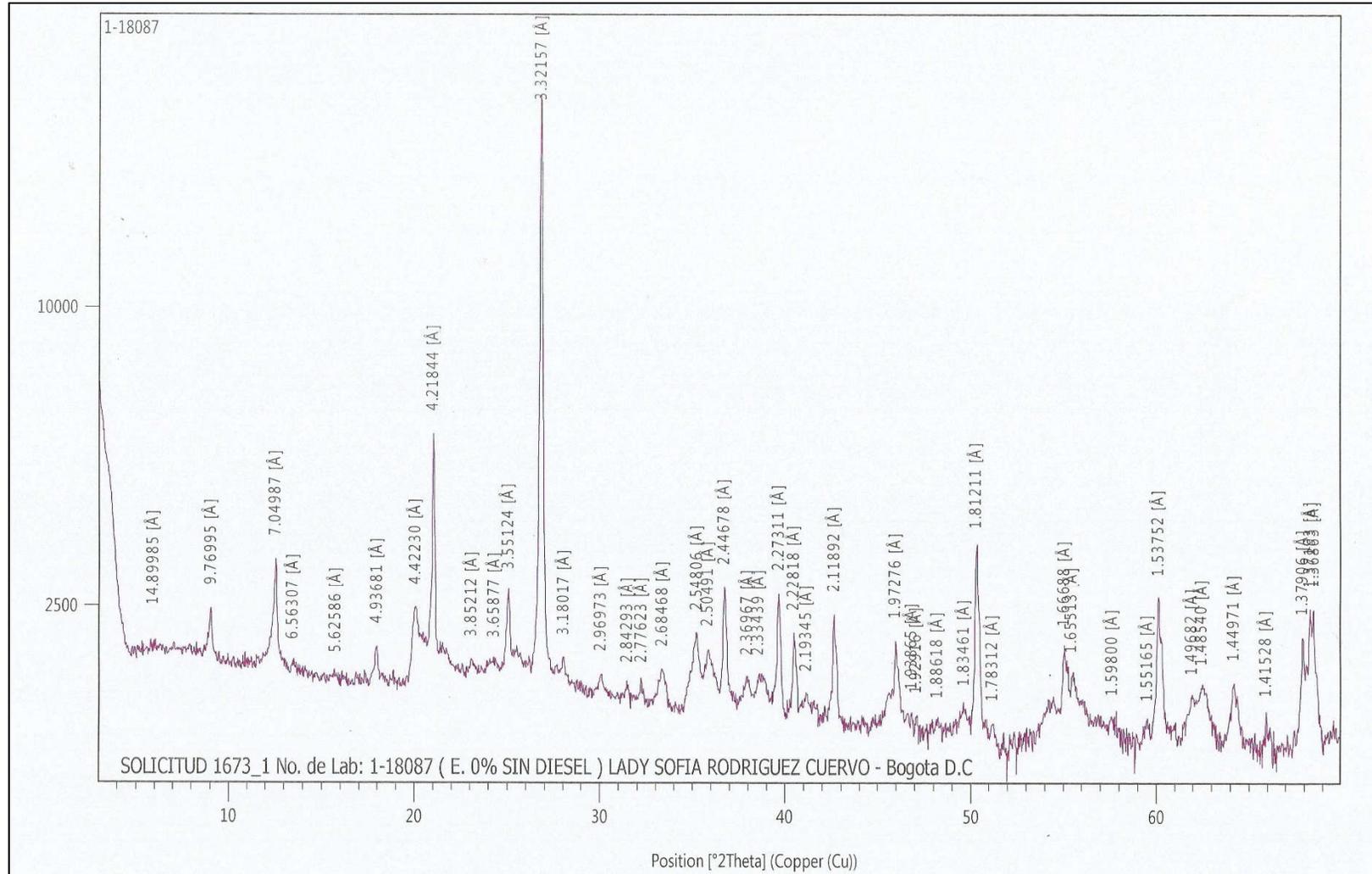
Anexo 22. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo C con 0% de diésel



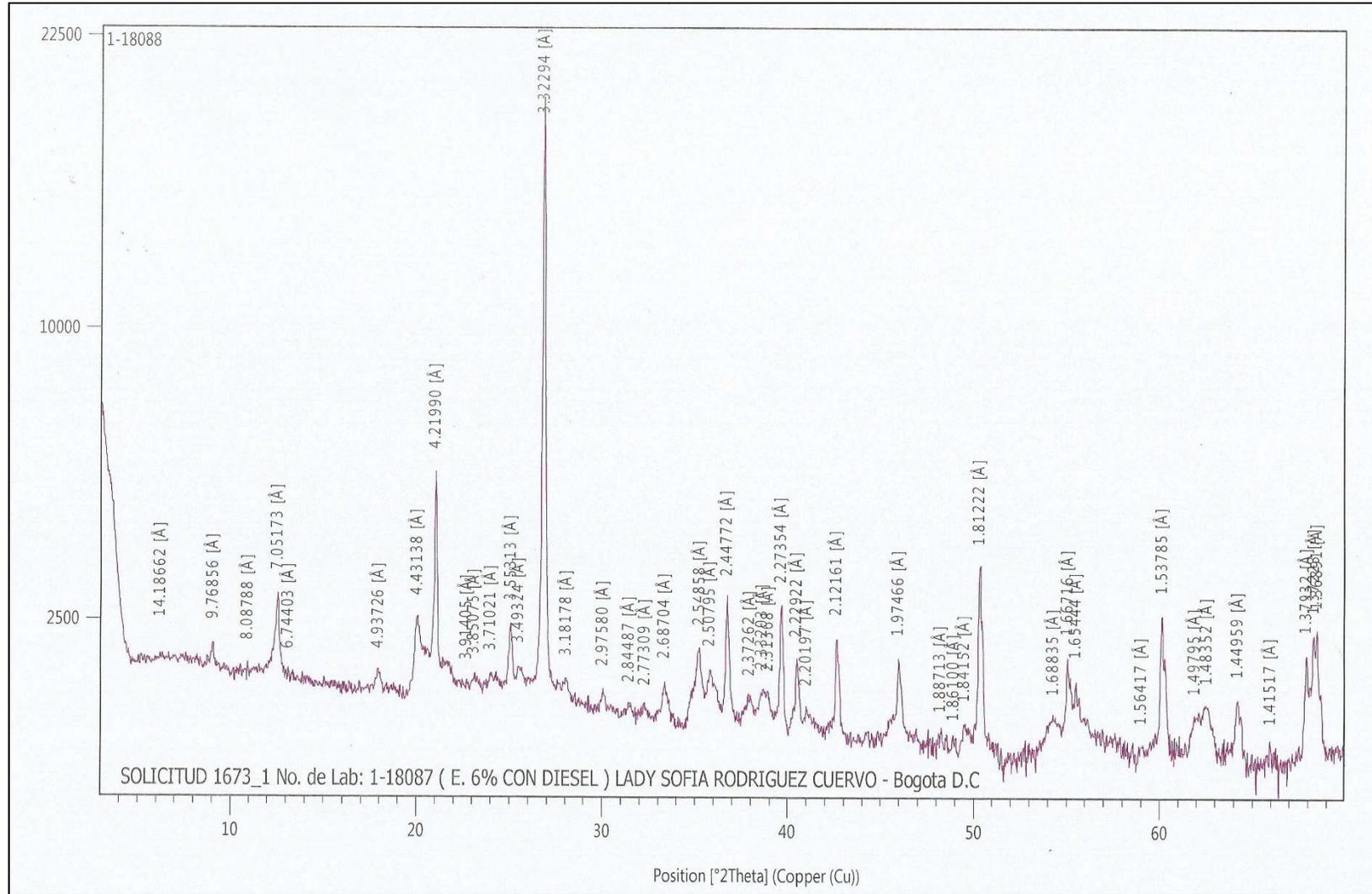
Anexo 23. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo C con 6% de diésel



Anexo 24. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo E con 0% de diésel

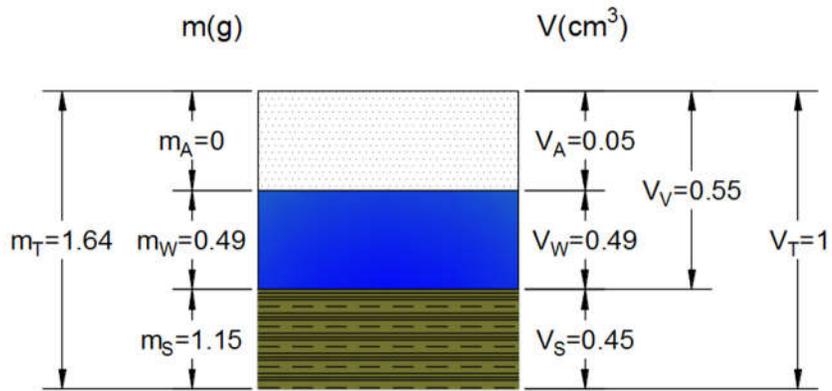


Anexo 25. Resultados de DRX muestra total (método del polvo) del suelo E con 6% de diésel

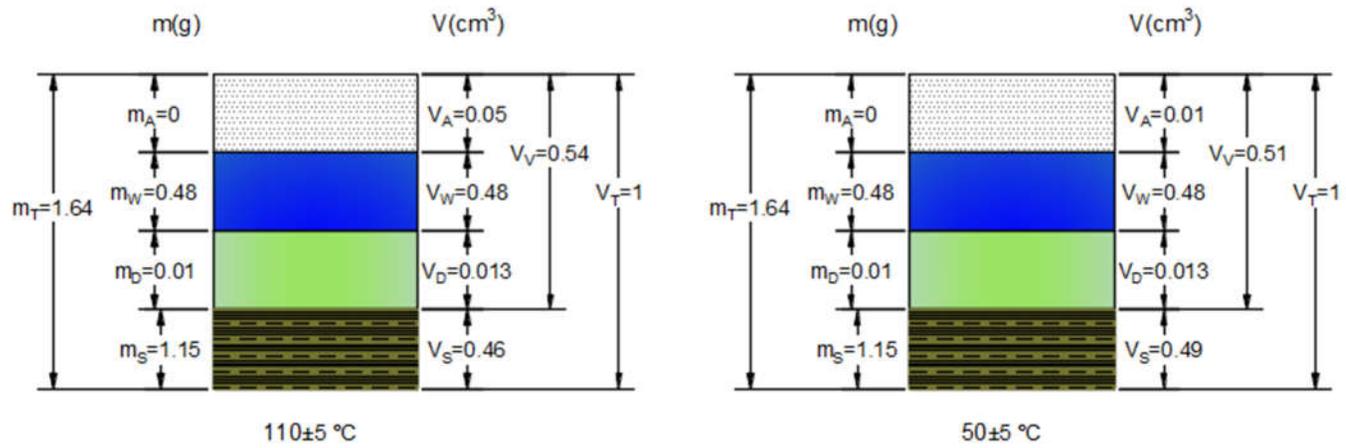


Anexo 26. Diagrama de fases del suelo A

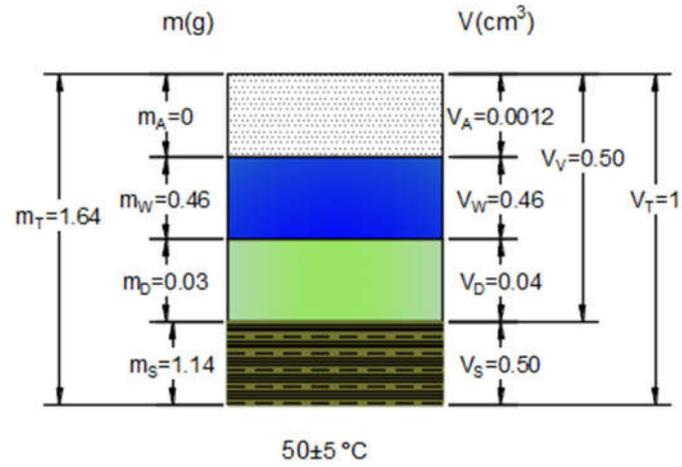
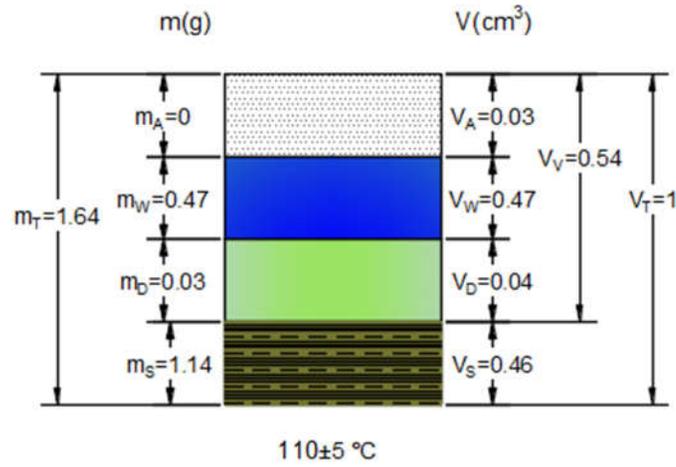
Suelo A con 0% de diésel



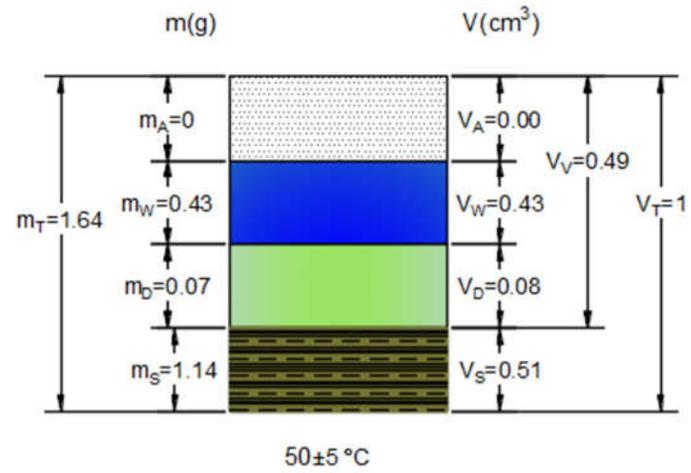
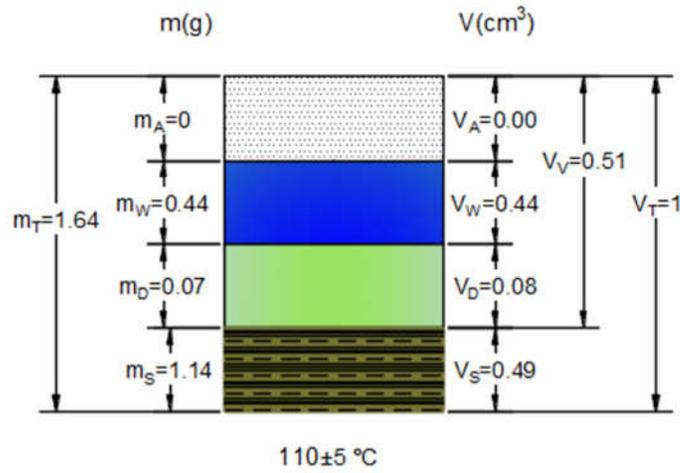
Suelo A con 1% de diésel



Suelo A con 3% de diésel

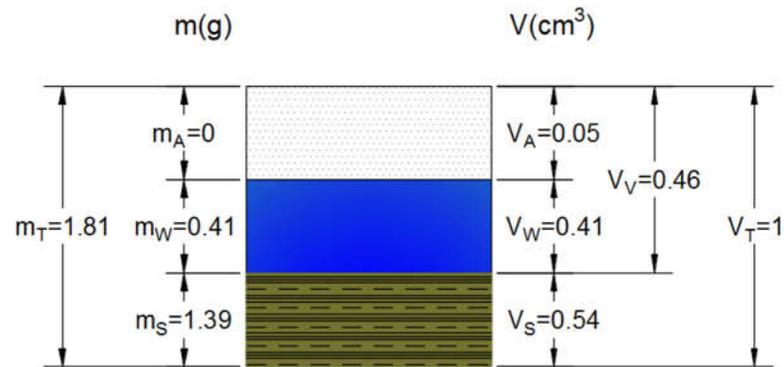


Suelo A con 6% de diésel

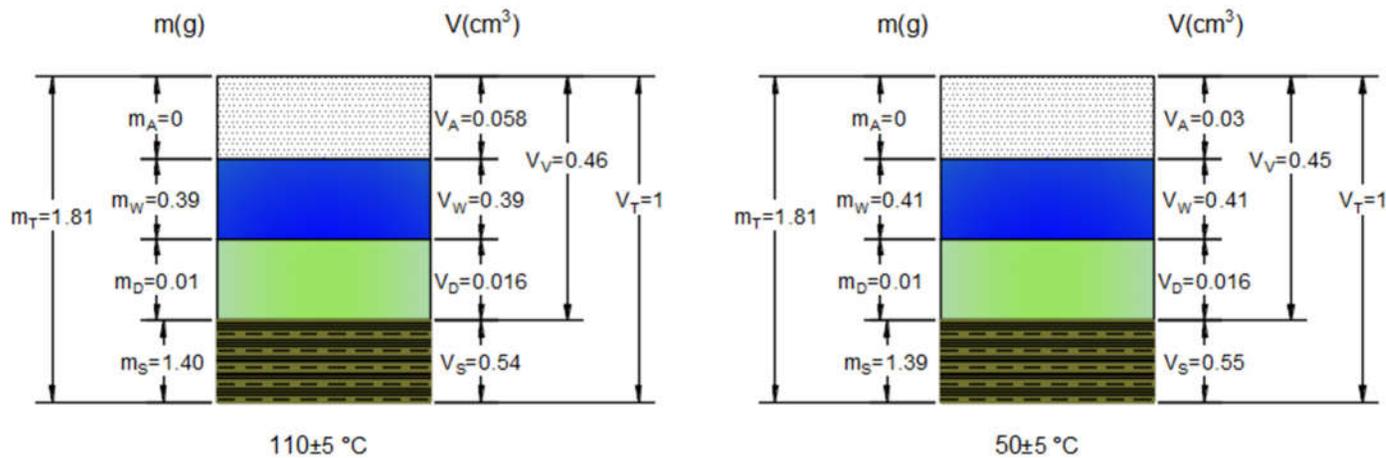


Anexo 27. Diagrama de fases del suelo B

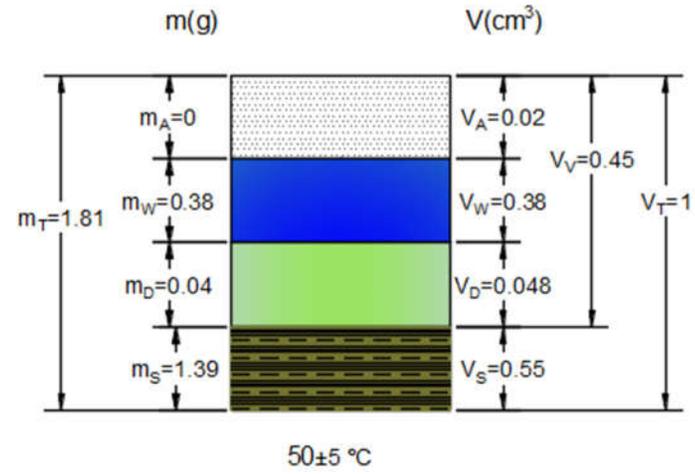
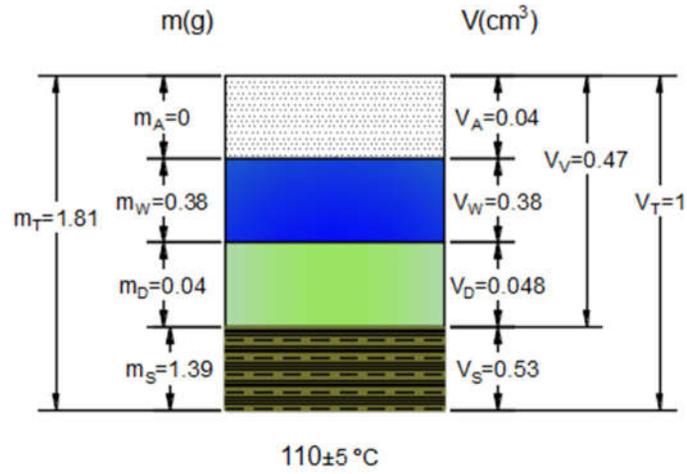
Suelo B con 0% de diésel



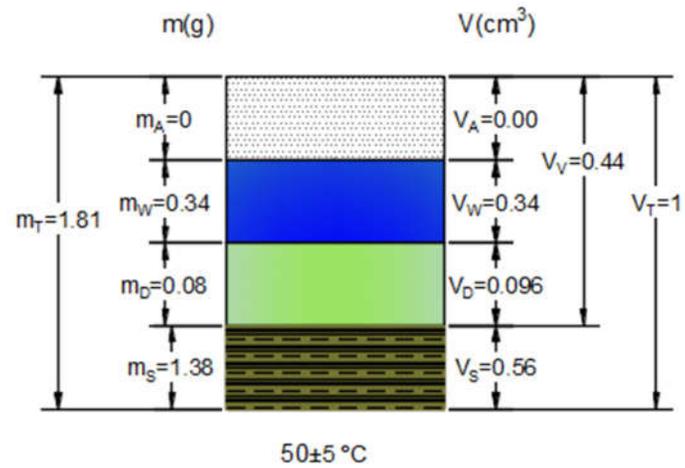
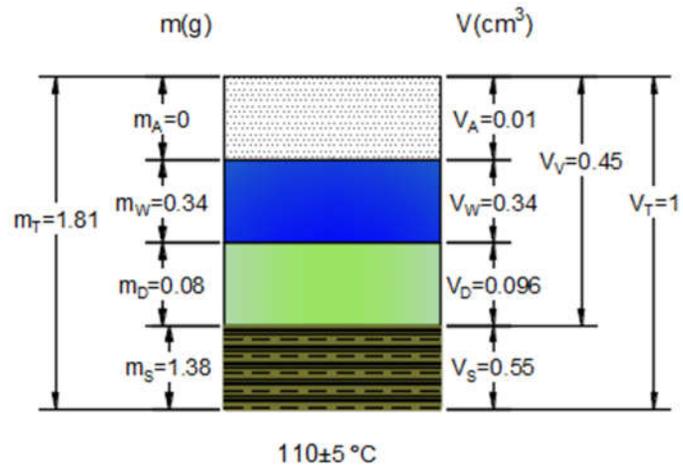
Suelo B con 1% de diésel



Suelo B con 3% de diésel

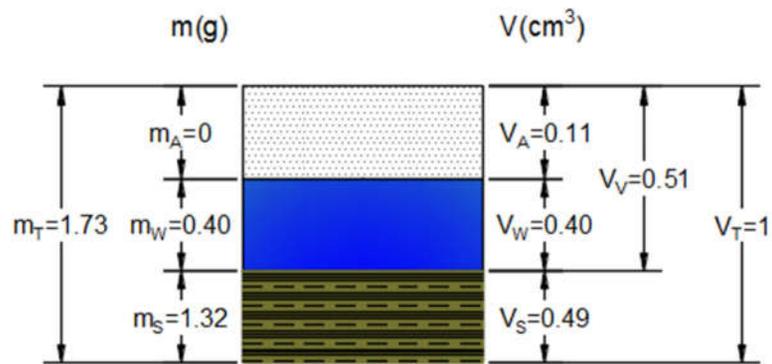


Suelo B con 6% de diésel

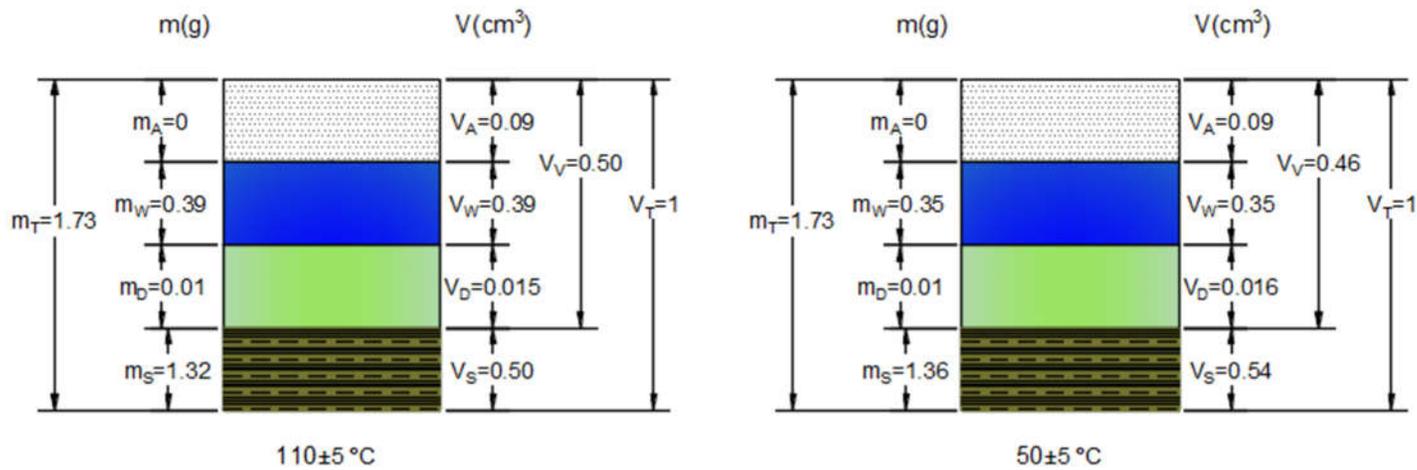


Anexo 28. Diagrama de fases del suelo C

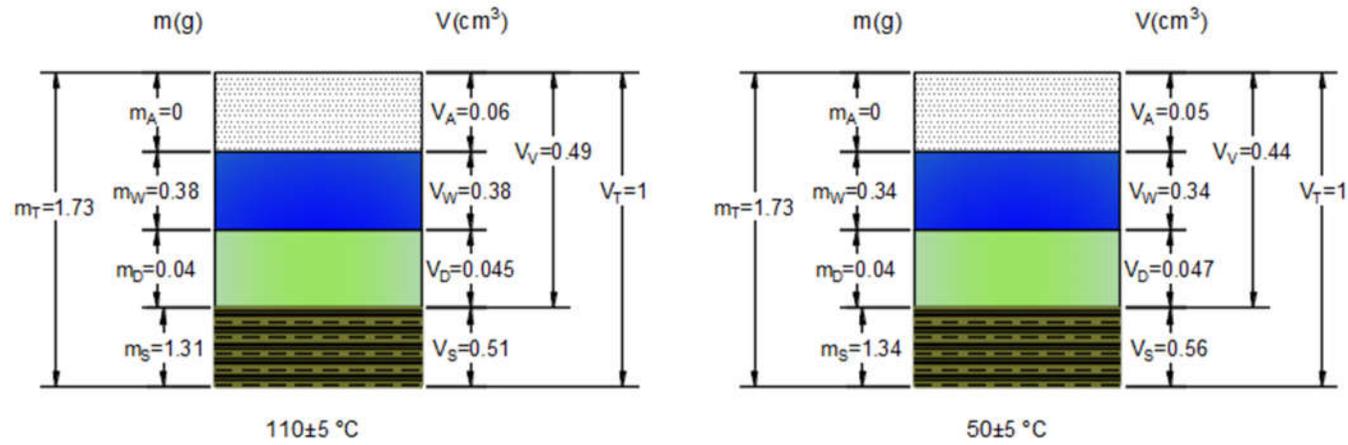
Suelo C con 0% de diésel



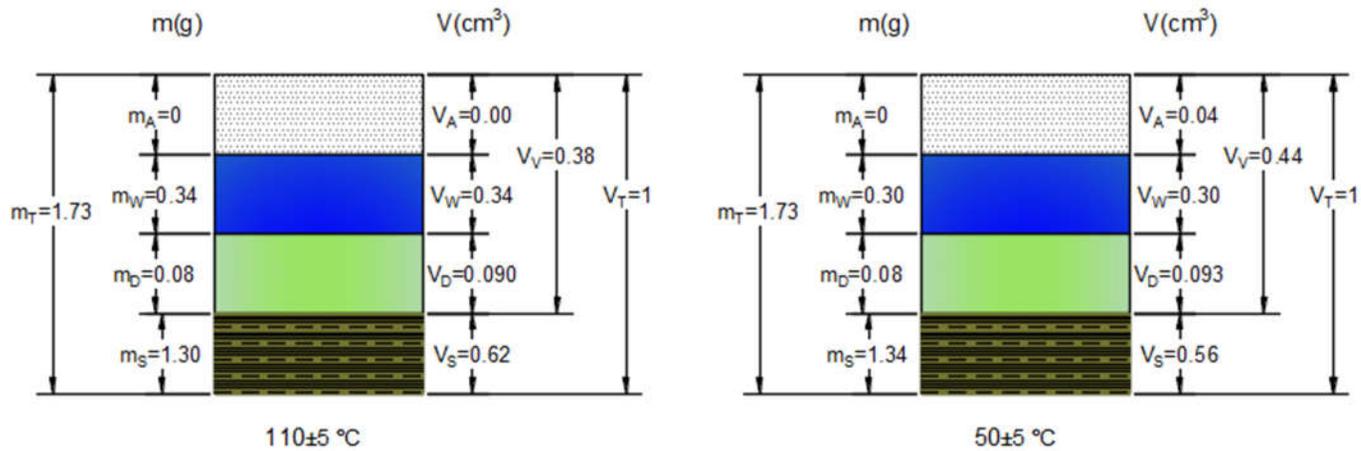
Suelo C con 1% de diésel



Suelo C con 3% de diésel

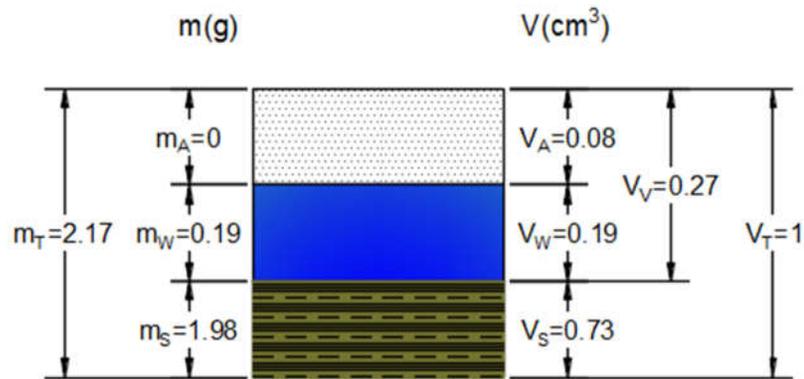


Suelo C con 6% de diésel

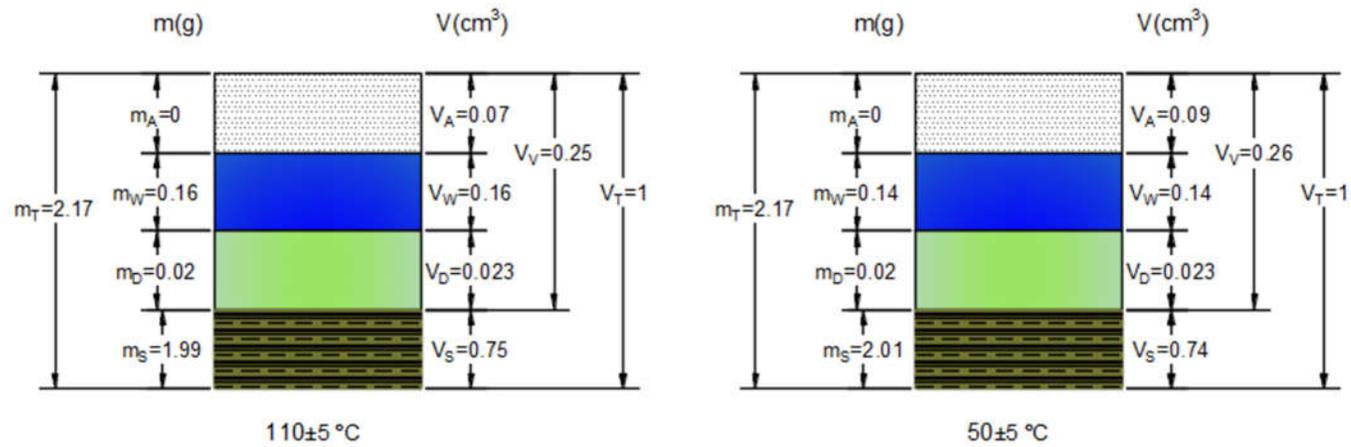


Anexo 29. Diagrama de fases del suelo E

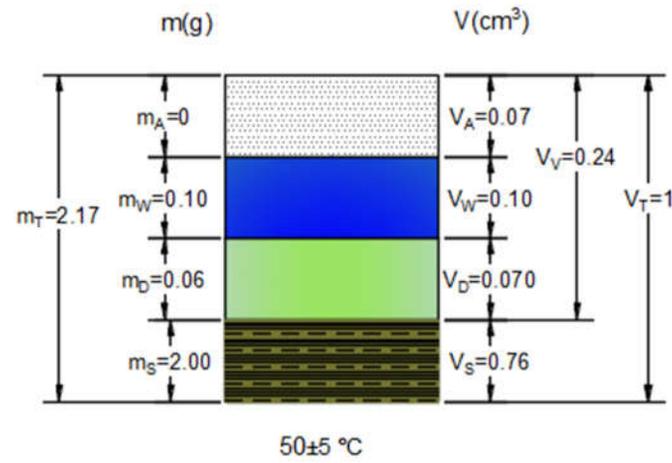
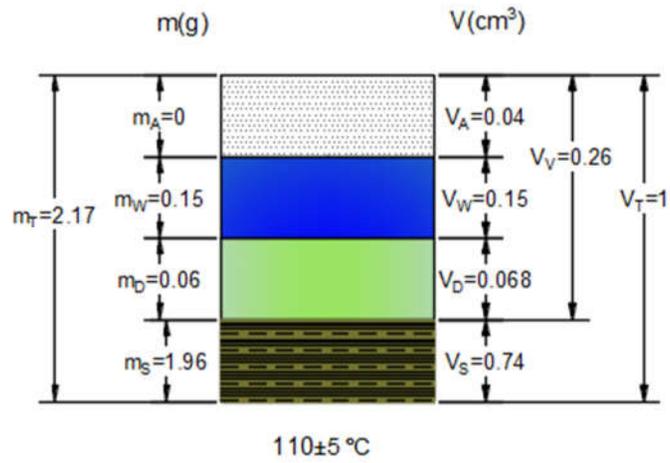
Suelo E con 0% de diésel



Suelo E con 1% de diésel



Suelo E con 3% de diésel



Suelo E con 6% de diésel

