



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

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN CON GASOLINA EN LOS
ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA EN UNA ARCILLA
EXPANSIVA**

Opción de titulación
Tesis

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

Presenta:
Norma Patricia Curiel Iñiguez

Dirigido por:
Dra. María de la Luz Pérez Rea

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Firma

Dr. Eduardo Rojas González
Secretario

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Firma

Dr. José Alberto Rodríguez Morales
Suplente

Firma

Dra. Elda Montes Zarazúa
Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre, 2018

RESUMEN

La población ha aumentado en el mundo, lo que ha generado un incremento en la demanda de productos derivados del petróleo, debido a que el sustento de la economía de muchos países depende de la industria petrolera, las actividades de explotación, refinera, almacenamiento, distribución y transporte de productos derivados del petróleo han aumentado, lo que genera que las emergencias ambientales provocadas por el derrame de hidrocarburos aumente en los últimos años. El contaminante puede llegar al suelo mediante fugas en tuberías dañadas o en toma clandestina, corrosión en tanques de almacenamiento, derrames en talleres mecánicos, accidentes durante el transporte, entre otros. México se encuentra entre los principales países productores de petróleo, además de que la contaminación de suelos por derrames de hidrocarburo se considera una de las mayores preocupaciones en materia medioambiental. Dentro de las emergencias ambientales reportadas para el año 2015 en México el 85.2% fueron provocadas por derrames de hidrocarburos y sustancias tóxicas, la gasolina se encuentra como segundo contaminante que genera más emergencias ambientales. Para el 2012 se tiene conocimiento de que en Querétaro existen 58 lugares contaminados por hidrocarburo. Cuando el hidrocarburo entra en el suelo su destino depende de factores climatológicos, propiedades del contaminante y de las propiedades del suelo. El suelo fino tiene la capacidad de retener el hidrocarburo debido a que el contaminante dispone de una mayor superficie específica para adherirse. Debido a esto, en esta investigación se estudió la modificación de los asentamientos que presentaba el suelo debido a su contaminación con gasolina magna, se estudió un suelo clasificado como una arcilla de alta compresibilidad (CH), que, en su estado seco, fue expuesta a la gasolina y se estudió su efecto a los 7 días de exposición y a los 9 meses para estudiar la modificación en sus propiedades geotécnicas y la consolidación. En los resultados se observó una disminución en la gravedad específica atribuida al recubrimiento de las partículas del suelo por la gasolina, en la granulometría no se observaron cambios significativos, en los límites de consistencia no se observó cambio significativo, el suelo contaminado se clasificó como arcilla de alta compresibilidad (CH) de la misma forma que el suelo natural, sin embargo la diferencia provocada en el índice plástico y el porcentaje de arcilla provocó un aumento en la actividad de las arcillas de 0.75 a 0.78 del suelo natural al contaminado, la superficie específica del suelo disminuyó de 691.51 a 514.06 m²/g, en la curva de consolidación se obtuvo que las velocidades de deformación que presentaba el suelo contaminado para cada incremento de carga eran de menor magnitud a las del suelo natural, en el suelo contaminado a los 7 días se tiene un índice de compresibilidad mayor con respecto al suelo natural, por lo que se concluye que el suelo contaminado presentara mayor deformación pero en un tiempo más largo.

Palabras clave: economía, industria petrolera, emergencias ambientales, gasolina, arcilla, asentamientos, superficie específica, índice de compresibilidad.

SUMMARY

The population has increased in the world, which has generated an increase in the demand for petroleum products, because the economy of many countries depends on the oil industry, the activities of exploitation, refinery, storage, distribution and transport of petroleum products have increased, which generates that environmental emergencies caused by the oil spill increase in recent years. The pollutant can reach the ground by leaking in damaged pipes or clandestine intake, corrosion in storage tanks, spills in mechanical workshops, accidents during transport, among others. Mexico is among the main oil-producing countries, as well as the contamination of soils by hydrocarbon spills is considered one of the biggest environmental concerns. Within the environmental emergencies reported for 2015 in Mexico, 85.2% were caused by spills of hydrocarbons and toxic substances, gasoline is the second pollutant that generates more environmental emergencies. By 2012 it is known that in Queretaro there are 58 places contaminated by hydrocarbons. When the hydrocarbon enters the soil its destination depends on climatological factors, properties of the pollutant and soil properties, the fine soil has the capacity to retain the hydrocarbon because the pollutant has a greater surface specific to adhere. Due to this, in this research it was decided to investigate the modification of the settlements that presented the soil due to its contamination with magna gasoline, a soil classified as a high compressibility clay (CH), which, in its dry state, was studied exposed to gasoline and its effect at 7 days of exposure and 9 months to study the modification in its geotechnical properties and consolidation. In the results it was observed a decrease in the specific gravity attributed to the coating of soil particles by gasoline, in the particle size distribution weren't observed significant changes, in the limits of consistency wasn't observed significant change, the contaminated soil was classify as high compressibility clay (CH) in the same way as the natural soil, however the difference caused in the plastic index and the percentage of clay caused an increase in the activity of clays from 0.75 to 0.78 from natural to contaminated soil, the specific surface of the soil decreased from 691.51 to 514.06 m²/g, in the consolidation curve was obtained that the deformation speed that the contaminated soil presented for each increase of load had lesser magnitude to those of the natural soil, in the contaminated soil to the 7 days has a greater compressibility index with respect to the natural soil, which leads us to conclude that the contaminated soil will present greater deformation but in a longer time.

Key words: economy, oil industry, environmental emergencies, gasoline, clay, settlements, specific surface, compressibility index.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por enseñarme a seguir mis sueños y lograrlos a pesar de los obstáculos que se puedan presentar.

A mis hermanos y hermanas por estar a mi lado cuando más los necesitaba, por escucharme y nunca dejarme sola, a los pequeños de la familia por ser siempre ese destello de luz y alegría en mi vida.

A Jesús Iván Valenzuela Delgado por acompañarme en mi vida académica, profesional y personal, cuidarme y escucharme durante este camino.

A mis amigos y compañeros del posgrado Silvana, Laura, Aby, Paulina, Daniel, Eli y Erick. Gracias chicas por su apoyo profesional y personal. Gracias Daniel por tu ayuda.

Al comité tutorial por su ayuda para la realización de la presente investigación. A la Dra. María de la Luz Pérez Rea por su guía, su apoyo, sus conocimientos y acompañarme hasta la finalización del proyecto de investigación.

A todos los profesores Doctores y Doctoras que me acompañaron y guiaron en esta formación profesional por compartir sus conocimientos y experiencias, en especial a los integrantes del comité sinodal.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindar un espacio y apoyo económico para el desarrollo de la ciencia y tecnología en el presente trabajo de investigación.

A todo el personal docente y administrativo de la Facultad de Ingeniería de la División de Investigación y Posgrado, por su apoyo durante mi posgrado.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	2
SUMMARY	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	31
1.3 JUSTIFICACIÓN	33
1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	34
1.4.1 <i>Hipótesis</i>	34
1.4.2 <i>Objetivo general</i>	35
1.4.3 <i>Objetivos específicos</i>	35
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	36
2.1 EL SUELO.....	36
2.2 SUELO EXPANSIVO	37
2.3 FISICOQUÍMICA DE LAS ARCILLAS	38
2.4 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO.....	39
2.5 CONSTANTE DIELECTRICA DEL SUELO	40
2.6 SUPERFICIE ESPECÍFICA	41
2.6.1 <i>Mediciones de absorción de azul de metileno</i>	42
2.6.2 <i>Desventajas de la prueba de azul de metileno</i>	43
2.6.3 <i>Isotermas de Langmuir</i>	44
2.7 CONSOLIDACIÓN DE SUELO.....	44

2.8	ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA	46
2.9	ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA	47
2.10	SUELO CONTAMINADO	49
2.11	TRANSPORTE Y MOVILIDAD DE LOS HIDROCARBUROS EN EL SUELO	50
2.12	GASOLINA	52
3.	METODOLOGÍA	55
3.1	LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO	55
3.2	MUESTREO DEL LOTE.....	56
3.3	PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO NATURAL	56
3.3.1	<i>Contenido de humedad.....</i>	<i>56</i>
3.3.2	<i>Masa volumétrica de la muestra</i>	<i>57</i>
3.3.3	<i>Gravedad específica.....</i>	<i>58</i>
3.3.4	<i>Límites de consistencia</i>	<i>59</i>
3.3.5	<i>Análisis granulométrico</i>	<i>60</i>
3.4	CONTAMINACIÓN DEL SUELO CON GASOLINA	61
3.5	PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO CONTAMINADO	61
3.5.1	<i>Obtención del porcentaje de gasolina retenido.....</i>	<i>62</i>
3.5.2	<i>Gravedad específica.....</i>	<i>63</i>
3.5.3	<i>Límites de consistencia</i>	<i>64</i>
3.5.4	<i>Análisis granulométrico</i>	<i>65</i>
3.6	OBTENCIÓN DEL PH	65
3.7	OBTENCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA	65
3.8	OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA	66
3.9	CURVA DE COMPRESIBILIDAD Y CURVAS DE CONSOLIDACIÓN.....	67
3.9.1	<i>Consolidación unidimensional en suelo natural.....</i>	<i>67</i>
3.9.2	<i>Consolidación unidimensional suelo contaminado.....</i>	<i>69</i>
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1	PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO NATURAL	73
4.2	PROPIEDADES DEL SUELO CONTAMINADO	75

4.2.1	<i>Contenido de gasolina del suelo contaminado</i>	75
4.2.2	<i>Propiedades geotécnicas del suelo contaminado</i>	78
4.3	COMPARATIVA DE PROPIEDADES DE SUELO NATURAL Y SUELO CONTAMINADO.....	80
4.4	PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN.....	83
4.5	CURVAS DE CONSOLIDACIÓN Y CURVA DE COMPRESIBILIDAD.....	84
4.6	PREDICCIÓN DEL ÍNDICE DE COMPRESIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS	96
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
6.	REFERENCIAS	104
7.	APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO NATURAL	113
7.1	HUMEDAD NATURAL	113
7.2	GRAVEDAD ESPECÍFICA	113
7.3	RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS.....	117
7.4	LÍMITES DE CONSISTENCIA	119
7.5	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	123
7.6	MATERIA ORGÁNICA	125
7.7	POTENCIAL DE HIDRÓGENO, PH.	125
7.8	SUPERFICIE ESPECÍFICA.	126
8.	APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO CONTAMINADO	126
8.1	CONTENIDO DE GASOLINA	126
8.2	GRAVEDAD ESPECÍFICA	130
8.3	LÍMITES DE CONSISTENCIA	132
8.4	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	136
8.5	POTENCIAL DE HIDRÓGENO, PH.	138
8.6	SUPERFICIE ESPECÍFICA.	138
9.	APÉNDICE A. PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN	1
9.1	CURVAS DE CONSOLIDACIÓN SUELO NATURAL.....	1
9.2	CURVAS DE CONSOLIDACIÓN SUELO CONTAMINADO 7 DÍAS.....	3
9.3	CURVAS DE CONSOLIDACIÓN SUELO CONTAMINADO 9 MESES.....	5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Contaminantes involucrados en emergencias ambientales en el periodo del 2008-2015 (Semarnat, 2016).	14
Figura 2-1 Doble capa difusa en suelos (Antonio Zárate, 2014).	38
Figura 2-2 Curva e-log σ' para una arcilla suave del este de San Louis, Illinois (Das, 2012).	46
Figura 2-3 Variación de e con $\log t$ ante un incremento de carga, y definición del índice de compresión secundaria (Das, 2012).	48
Figura 2-4 Fases del suelo contaminado y no contaminado de acuerdo a Amaziah (2010) (Elaboración propia).	51
Figura 2-5 Visualización de los granos del suelo antes y después de la contaminación Amaziah (2010) (Elaboración propia).	51
Figura 3-1 Ubicación geográfica del sitio de muestreo (Google Earth, 2018).	55
Figura 4-1 Curva de análisis termogravimétrico del suelo contaminado.	77
Figura 4-2 Cálculos para el remoldeo.	84
Figura 4-3 Curva de consolidación del suelo natural con la carga de sitio más 50 kPa.	85
Figura 4-4 Curva de consolidación del suelo contaminado con la carga de sitio más 50 kPa.	85

Figura 4-5 Curva de consolidación suelo natural, carga de 50 kPa, escala aritmética.	86
Figura 4-6 Curva de consolidación suelo natural, carga de 50 kPa, escala aritmética.	86
Figura 4-7 Curvas de compresibilidad.....	87
Figura 4-8 Comportamiento de las velocidades de deformación con respecto al tiempo del suelo en la Carga 1 de 50 kPa.	89
Figura 4-9 Comportamiento de las velocidades de deformación con respecto al tiempo del suelo en la Carga 2 de 100 kPa.	89
Figura 4-10 Comportamiento de las velocidades de deformación con respecto al tiempo del suelo en la Carga 1 de 200 kPa.	90
Figura 4-11 Velocidades de asentamiento a los 15 días de carga del suelo.	92
Figura 4-12 Asentamientos en milímetros que presenta el suelo natural y contaminado cuando se le agrega una carga de 50 kPa a la carga de sitio.....	93
Figura 4-13 Asentamientos en milímetros que presenta el suelo natural y contaminado cuando se le agrega una carga de 100 kPa a la carga de sitio.....	93
Figura 4-14 Asentamientos en milímetros que presenta el suelo natural y contaminado cuando se le agrega una carga de 200 kPa a la carga de sitio.....	94
Figura 4-15 Curvas de compactación Proctor Estándar de suelo natural y contaminado.....	95

Figura 4-16 Índice de compresibilidad del suelo en función de sus curvas de compresibilidad.99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Superficie específica y capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales de arcilla (Das, 2014).....	40
Tabla 2.2 Composición de la gasolina magna comercial mexicana (Vázquez, 1999).	52
Tabla 4.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo natural.....	73
Tabla 4.2 Propiedades geotécnicas suelo natural.	74
Tabla 4.3 Porcentaje de gasolina.....	75
Tabla 4.4 Propiedades geotécnicas del suelo contaminado.	79
Tabla 4.5 Propiedades de suelo natural y suelo contaminado.....	81
Tabla 4.6 Relación de vacíos y deformaciones de curvas de consolidación.	88
Tabla 4.7 Valores de velocidades de asentamiento para cada carga.....	91
Tabla 4.8 Relaciones volumétricas y gravimétricas de acuerdo a los óptimos de compactación Proctor Estándar.	95
Tabla 4.9 Relaciones empíricas entre el índice de compresibilidad C_c y propiedades geotécnicas del suelo (Singh et al., 2008).	96
Tabla 4.10 Predicción de índice de compresibilidad de acuerdo a Singh et al. (2008).	98
Tabla 4.11 Índice de compresibilidad del suelo natural y contaminado.	98

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La población mundial ha aumentado con el paso de los años, lo que ha generado un aumento en el consumo y en la demanda del petróleo y productos derivados del mismo, las actividades de extracción, refinamiento y transporte de hidrocarburos han aumentado, así como la necesidad de más centros de almacenamiento, lo que ha llevado a que la posibilidad de que las fugas o derrames de hidrocarburos en el suelo se incremente en todo el mundo (Pusadkar y Bharambe, 2014).

Los productos derivados del petróleo han ido presentando una producción masiva y un uso extendido en todo el mundo, por lo que son considerados como una fuente común de contaminación de la superficie del suelo y el subsuelo, su presencia en el medio natural genera preocupación por su toxicidad, su composición fisicoquímica y su punto de ignición (Muskus Morales et al., 2013).

Existen muchas maneras mediante las cuales el contaminante puede llegar al suelo, como son las fugas provocadas por daños en tuberías o en las instalaciones de transporte de petróleo, accidentes en los tanques, procesos de perforación y corrosión en tuberías o tanques, derrames en los talleres mecánicos durante la reparación y el mantenimiento a los automóviles y maquinaria de construcción, etcétera (Nasehi et al., 2016; Sabat y Mohanta, 2017).

De la industria de hidrocarburos depende mayoritariamente la economía de México y de muchos otros países. Para el año 2004 México se encontraba como el quinto productor de petróleo crudo a nivel mundial (Tosoni, 2007). La infraestructura de la industria petrolera integrada por pozos, baterías de separación, complejos procesadores de gas, centrales de almacenamiento y bombeo, y red de ductos

poseen riesgos inherentes de fugas, lo cual, en caso de suscitarse, representaría un impacto negativo hacia el ambiente (Ortínez Brito et al., 2003).

Actualmente se sabe que la contaminación de los suelos afecta sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, además de estar asociados a muchos problemas ambientales. Aunque se han hecho muchos esfuerzos por estudiar las repercusiones de la contaminación de los suelos con hidrocarburos, la mayoría de los estudios efectuados se han centrado únicamente en la variable ambiental y se ha puesto poca atención en el efecto en las propiedades geotécnicas de los suelos contaminados (Pusadkar y Bharambe, 2014; Nasehi et al., 2016).

La extensión del contaminante depende de características del suelo como la unidad del suelo, permeabilidad, estructura, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, también depende de factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial junto con esto, se debe agregar la influencia de algunas propiedades físicas y químicas del contaminante como la densidad, polaridad, volatilización y viscosidad (Nasehi et al., 2016).

En materia medioambiental en México se considera una de las mayores preocupaciones a la contaminación de los suelos por hidrocarburos, debido a que los accidentes relacionados con las tomas clandestinas o al mal estado de las instalaciones han llegado a contaminar grandes porciones de terreno (Pérez et al., 2006). Se conocen tres causas principales a las que se les atribuyen los derrames de hidrocarburos durante su transporte: accidentes carreteros o ferroviarios; fugas en los tanques de almacenamiento y/o líneas de conducción y los que ocurren en las tomas clandestinas (Cabello-Suárez, 2015).

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) para el año 2015 tiene registro de 1,562 emergencias ambientales, de las cuales 1,331 (85.2%) fueron provocadas por derrames de hidrocarburos y otras sustancias químicas (PROFEPA, 2015). Entre los años 2008-2011, se identificaron 514 sitios

contaminados, cuyos responsables fueron los transportistas con 379 emergencias (73.6% del total registrado), PEMEX con 100 (19.5%) y por los ferrocarriles (1.6%) (SEMARNAT, 2012).

En la Figura 1-1 se muestran los contaminantes involucrados en las emergencias ambientales en el periodo 2008-2015, teniendo; los hidrocarburos con 1,175 emergencias, gasolina 1,057, diésel 554, petróleo crudo 461 emergencias, gas L. P. 375, gas natural 162 y combustóleo 159. Los dos primeros contaminantes estuvieron involucrados en el 56.6% de las contingencias ambientales registradas en ese periodo (SEMARNAT, 2016).

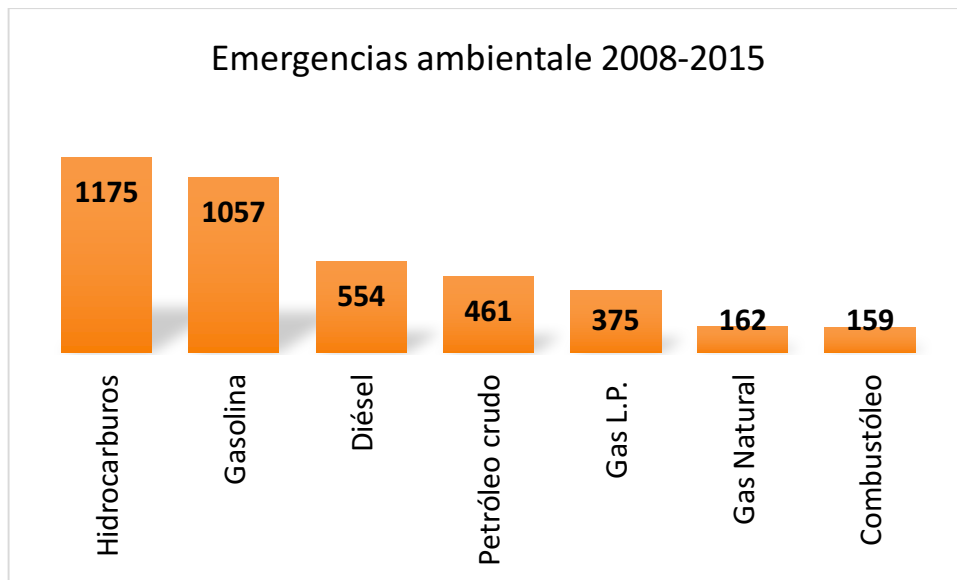


Figura 1-1 Contaminantes involucrados en emergencias ambientales en el periodo del 2008-2015 (SEMARNAT, 2016).

Para el periodo 1995-2000, la Semarnat tenía identificados 166 sitios contaminados registrados con materiales o residuos peligrosos; para el año 2011 ya se tenían registrados 582 sitios. Para el 2011, se tiene el conocimiento de que en Querétaro existen 58 lugares contaminados (SEMARNAT, 2012). Sin embargo, la fuente no proporciona información acerca de la ubicación de los lugares, del área contaminada ni del contaminante involucrado, esto puede deberse a la protección

de su producto y sus tuberías, ya que, si se publicaran la ubicación de los sitios contaminados, el público tendría el conocimiento de por donde pasan las tuberías de hidrocarburo.

Dentro de las estadísticas mencionadas es posible apreciar el incremento de las emergencias ambientales causadas por derrames de hidrocarburo, así como de los sitios contaminados por hidrocarburos, lo que lleva a prestar atención al efecto que los hidrocarburos pueden tener en el suelo no solo a nivel ambiental, sino también en propiedades ingenieriles.

Los suelos expansivos contienen un tipo de arcilla que se expande cuando entra en contacto con el agua y se contrae cuando se seca, son problemáticos por su naturaleza de modificación de volumen dependiendo del agua contenida, por lo que, su contaminación aumenta su complejidad en la construcción (Sabat y Mohanta, 2017). La persistencia del hidrocarburo en el suelo aumenta cuanto más pequeño es el tamaño de las partículas puesto que aporta mayor área superficial, debido a ello se considera importante revisar la modificación de las propiedades de los suelos finos contaminados con hidrocarburos (Rodríguez, 2017).

A continuación se presentan las variaciones en las propiedades geotécnicas y mecánicas que son de interés en esta investigación, encontradas en la revisión bibliográfica.

Gravedad específica de sólidos

Dentro de los estudios revisados, Akinwumi et al. (2014) y Pusadkar y Bharambe (2014) reportan una disminución en el valor de la gravedad específica del suelo en presencia del hidrocarburo, ambos autores estudiaron un suelo arcilloso con diferentes concentraciones de hidrocarburo; petróleo crudo y diésel, respectivamente, sin embargo Echeverri-Ramírez et al. (2015) que estudiaron un suelo limoso de alta plasticidad contaminado con gasolina, reportan que no hubo

cambios significativos en el parámetro de gravedad específica del suelo causado por la contaminación.

Granulometría

Dentro de las investigaciones que reportan modificaciones presentadas en el tamaño de partícula del suelo basándose en sus curvas granulométricas se tiene que Martínez y López (2001) y Bian et al. (2016) estudiaron suelos arcillosos, contaminados con diésel y combustóleo y con diferentes concentraciones de diésel, respectivamente, reportando una modificación aparente en el contenido de arcillas y limos en el suelo contaminado en comparación a los resultados obtenidos para el suelo sin contaminar, además Bian et al. (2016) encontraron que el tiempo de exposición y la concentración del contaminante cambian la distribución de tamaños de partícula en el suelo.

Ocampo et al. (2010) y Nasehi et al. (2016) estudiaron una arena limosa (SM) y una arena costera contaminadas con gasolina y petróleo, respectivamente, reportando un aumento en el contenido de arcillas y mayor cantidad de finos observado en las curvas granulométrica de los suelos contaminados. En contraste a estos dos trabajos Ijimdiya (2013) estudio una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminada con aceite de motor observando en las curvas de distribución de tamaño de partículas una reducción en el porcentaje de finos con el aumento en el contenido del aceite.

También se reporta que la contaminación no afectó la distribución de tamaño de partícula observado en las curvas granulométricas por los autores Oyegbile y Ayininuola (2013); y Echeverri-Ramírez et al. (2015) que estudiaron un suelo laterítico y un suelo limoso de alta compresibilidad contaminados con petróleo y gasolina, respectivamente.

Límites de Atterberg

Son abundantes los estudios acerca de los cambios en los límites de Atterberg de los suelos debido a su contaminación con algún hidrocarburo, algunos resultados concuerdan, sin embargo, otros son contrarios.

Los autores Jia et al. (2011), Akinwumi et al. (2014) y Pradeepan et al. (2016) estudiaron un suelo costero y suelos arcillosos contaminados con diferentes porciones de petróleo crudo y diésel, encontrando un incremento en los valores del límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad con el aumento en la contaminación, por lo que Pradeepan et al. (2016) concluyeron que el suelo contaminado es menos trabajable.

Olchawa y Kumor (2008), Kermani y Ebadi (2012), Khosravi et al. (2013) Antonio Zárate (2014), Pusadkar y Bharambe (2014) y Nasehi et al. (2016), estudiaron suelos arcillosos y limosos contaminados artificialmente con petróleo, diésel y gasóleo, reportando que los valores del límite líquido y el límite plástico aumentaron conforme aumentaba el porcentaje de contaminación, a excepción de Khosravi et al. (2013) que, estudiando una arcilla de baja compresibilidad contaminada con diésel reporta una disminución en el límite plástico, además Pusadkar y Bharambe (2014) reportan un incremento en el límite de contracción en una arcilla contaminada con diésel y petróleo.

Khosravi et al. (2013) estudiaron una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminada con diésel encontraron un aumento en el índice de plasticidad, sin embargo, Kermani y Ebadi (2012) y Nasehi et al. (2016) estudiaron arcillas de baja compresibilidad (CL) y un limo de baja compresibilidad (ML) contaminados con petróleo y gasóleo reportan una disminución en el índice de plasticidad, mientras que Antonio Zárate (2014) encontró que en una arcilla de alta compresibilidad (CH) contaminada con diésel la variación en el índice de plasticidad no es significativa.

Rahman et al. (2010), Nazir (2011), Oyegbile y Ayininuola (2013), Joseph y Hari (2015) y Liu et al. (2015) estudiaron suelos limosos, arcillosos y suelos lateríticos contaminados con aceite de motor, diésel y petróleo crudo, reportando una disminución en el límite líquido y el límite plástico cuando aumentaba el contenido de contaminante, Nazir (2011) que estudió el efecto del tiempo de exposición de una arcilla al aceite del motor observó que la disminución de los valores es hasta un periodo de tres meses de exposición al contaminante después permanecen constantes. Oyegbile y Ayininuola (2013) y Joseph y Hari (2015) encontraron que en suelos lateríticos y arcillas contaminadas con petróleo y diésel el índice de plasticidad disminuye, mientras que Rahman et al. (2010) reportan que el índice de plasticidad aumentó en el limo de alta compresibilidad debido a su contaminación con aceite de motor, también Oyegbile y Ayininuola (2013) reportan una disminución en la contracción lineal en un suelo laterítico contaminado con petróleo crudo con el incremento en el tiempo de exposición.

Huang y Lu (2014) realizaron un extenso estudio y el análisis de los límites de Atterberg de una arcilla contaminada con diésel y petróleo encontrando que el límite líquido y el índice de plasticidad no tuvieron cambios significativos cuando la contaminación fue inferior al 3% de petróleo crudo en peso seco del suelo, el valor del límite líquido del suelo contaminado con petróleo crudo aumentó, mientras el suelo contaminado con diésel disminuyó, el límite plástico del suelo contaminado disminuye en el suelo debido a su contaminación ya sea con petróleo o diésel y el índice de plasticidad aumenta en el suelo contaminado. Fernández Serrano et al. (2012) reportan un aumento en la plasticidad de una arena cuando se contamina con hidrocarburos en porcentajes inferiores a 2 y 5% de peso de suelo seco, después disminuye.

Cabello-Suárez et al. (2017a) estudiaron una arcilla de alta compresibilidad contaminada con diésel, reportan haber observado una reducción del 60% en el valor del límite líquido y que el límite plástico no se pudo determinar debido a que la

arcilla presentó un comportamiento arenoso, esto coincide con lo reportado por Di Matteo et al. (2011) que estudiando una arcilla caolinita contaminada con diferentes proporciones de gasolina y etanol, reportan que el límite plástico no se pudo obtener debido a que en presencia del contaminante gasolina-etanol el suelo adquiere un comportamiento arenoso, sin embargo ellos reportan que el límite líquido aumentó en presencia del contaminante. Echeverri-Ramírez et al. (2015) reportan no haber encontrado cambios en los límites de consistencia en un limo de alta compresibilidad contaminado con gasolina.

Características de compactación

En las características de compactación de los suelos los autores Rahman et al. (2010), Kermani y Ebadi (2012), Nasehi et al. (2016) y Sabat y Mohanta (2017) que estudiaron suelos como; dos limos de alta compresibilidad (MH), arcilla de baja compresibilidad (CL), limo de baja compresibilidad (ML), arena mal graduada (SP) y arcilla de alta compresibilidad (CH), contaminada con aceite de motor, petróleo crudo, gasóleo y diésel, reportaron que en las curvas de compactación Proctor Estándar se presentaba una disminución en la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad a medida que aumentaba en contenido de contaminante, de la misma forma Akinwumi et al. (2014), Pusadkar y Bharambe (2014) y Pradeepan et al. (2016) reportan haber encontrado una disminución en la densidad seca máxima del suelo y en el contenido óptimo de humedad estudiando suelos arcillosos de baja y alta compresibilidad (CL y CH) contaminados con diésel y petróleo crudo, sin embargo no especifican la prueba de compactación realizada.

Oyegbile y Ayininuola (2013) y Joseph y Hari (2015) estudiaron suelos lateríticos contaminados con petróleo crudo y diésel en diferentes proporciones, reportan haber encontrado una disminución en la densidad seca máxima del suelo en la prueba de compactación, sin embargo Oyegbile y Ayininuola (2013) reportan que el contenido óptimo de humedad tuvo un aumento conforme aumentaban los días de exposición al petróleo crudo y Joseph y Hari (2015) reportan un

comportamiento constante en el contenido óptimo de humedad con el aumento en el contenido de diésel.

Fernández Serrano et al. (2012) estudiaron una arena contaminada con hidrocarburos en diferentes proporciones, observando un aumento en la densidad seca en pruebas de compactación a medida que aumenta el contenido de contaminante, hasta llegar al 5% de hidrocarburo sobre peso seco, donde presenta disminución.

Compresión simple

Los autores Nazir (2011), Pradeepan et al. (2016) y Sabat y Mohanta (2017) que estudiaron arcillas de alta compresibilidad contaminadas con aceite de motor y diésel, reportan haber encontrado una disminución en el esfuerzo a la presión no confinada al incrementar la contaminación en el suelo, Nazir (2011) que también estudió el efecto de la duración de la contaminación reporta que esta disminución se presenta hasta un periodo de 6 meses de contaminación, después se mantuvo constante.

Ijimdiya (2013) y Nasehi et al. (2016) estudiaron suelos clasificados como arcilla de alta compresibilidad (CH) , arcilla de baja compresibilidad (CL) y limo de baja compresibilidad (ML) contaminados con gasóleo y aceite de motor en diferentes proporciones, reportan que el esfuerzo a la presión no confinada mostró un incremento inicial hasta un contenido de gasóleo del 3% en peso de suelo seco en el caso reportado por Nasehi et al. (2016) y un contenido del 2% de aceite de motor en peso de suelo seco reportado por Ijimdiya (2013), después de estos porcentajes el esfuerzo a la presión no confinada disminuye conforme aumenta el contenido de hidrocarburo. Ijimdiya (2013) concluye que el aumento inicial observado puede deberse a la reorganización de las partículas, conforme aumentó el contenido de aceite apareció el efecto de lubricación que conduce a la falla dentro de un periodo más corto. Fernández Serrano et al. (2012) estudiaron una arena

contaminada con hidrocarburos en diferentes grados observaron que la capacidad portante del suelo disminuye en función del grado de contaminación del suelo.

Los resultados anteriores contradicen a lo reportado por George et al. (2015) quienes estudiando una arena limosa (SM) contaminada con diferentes porcentajes de diésel observaron un aumento en el esfuerzo a la presión no confinada conforme incrementaba el porcentaje de diésel.

Corte directo

De los estudios que reportan resistencia al corte directo, Rahman et al. (2010), Ocampo et al. (2010) y George et al. (2015) que estudiaron limos de alta compresibilidad (MH), arena limosa (SM) y un suelo areno limoso (SM) contaminados con aceite de motor, gasolina y diésel en diferentes proporciones reportan una disminución en la resistencia al corte del suelo, C_u , con el aumento en el contenido de contaminante, esto contrasta con lo concluido por Khosravi et al. (2013) que estudiando una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminada con diferentes proporciones de diésel, obtuvieron que muestra mayor resistencia la arcilla con diésel que con agua en las mismas proporciones.

Echeverri-Ramírez et al. (2015) y Joseph y Hari (2015) que estudiaron el efecto de la contaminación en un limo de alta compresibilidad, suelo laterítico, una arena y una arcilla contaminados con gasolina y diésel, reportan haber obtenido una disminución en los valores de cohesión y el ángulo de fricción interna de los suelos contaminados, Joseph y Hari (2015) no especifican de que prueba se obtienen estos valores, de la misma forma Fernández Serrano et al. (2012) que reportan una disminución en el ángulo de fricción interna de una arena contaminada con hidrocarburos en diferentes proporciones y Echeverri-Ramírez et al. (2015) reportan haber obtenido estos valores de la prueba de corte directo, que coinciden con los resultados obtenidos por Nasehi et al. (2016) que reportan disminución en la cohesión y el ángulo de fricción interna en un limo de baja compresibilidad (ML) y

una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminadas con 3% en base al peso seco del suelo de gasóleo, sin embargo, estos autores reportan un incremento en la cohesión y en el ángulo de fricción interna en una arena mal graduada (SP) contaminada con menos del 3% en base al peso seco del suelo de gasóleo .

Kermani y Ebadi (2012) estudiando el efecto del porcentaje de contaminación y el tiempo de envejecimiento de una arcilla de baja compresibilidad (CL) contaminada con petróleo crudo, reportan que en la resistencia al corte del suelo se produce una reducción en la cohesión a medida que aumenta el contenido de petróleo y el tiempo de exposición al contaminante, el ángulo de fricción interna aumenta a medida que aumenta el contenido de petróleo y el tiempo de envejecimiento no muestra un efecto en el ángulo de fricción interna. Jia et al. (2011) reportan que el ángulo de fricción interna y la cohesión obtenidos en la prueba de corte directo se ven afectados en una arena debido a su contaminación con petróleo, sin reportar si estos valores aumentan o disminuyen.

Pruebas triaxiales

Antonio Zárate (2014) realizó pruebas triaxiales drenadas consolidadas en un suelo arcilloso de alta compresibilidad (CH) contaminada con diferentes proporciones de diésel, comparando los resultados obtenidos en el suelo natural concluyó que el suelo se vuelve más rígido conforme aumenta la cantidad de diésel lo que hace que presente una falla frágil, reporta que la cohesión disminuye en presencia del contaminante, este resultado coincide con lo obtenido por Amaziah (2010) que obtuvo una disminución en la cohesión en la prueba no drenada de un suelo arcilloso debido a su contaminación con petróleo crudo, sin embargo Amaziah (2010) reporta una reducción en el ángulo de fricción interna en la prueba no drenada y Antonio Zárate (2014) observó un comportamiento constante del ángulo de fricción interna conforme aumentaba la cantidad de diésel. Antonio Zárate (2014) concluye de las pruebas triaxiales que la contaminación produce una disminución en la capacidad de carga y Amaziah (2010) concluye que la contaminación produce

una disminución en la resistencia al corte calculada en función de los resultados de la prueba triaxial.

Rahman et al. (2010) estudiaron las modificaciones que presentaban dos limos de alta compresibilidad (MH) contaminados con diferentes cantidades de aceite de motor reportando que el esfuerzo desviador máximo, $q_{m\acute{a}x}$, obtenido en la prueba no drenada no consolidada mostró una disminución con la presencia del aceite.

Consolidación

Los resultados encontrados con respecto al cómo afecta la contaminación con algún hidrocarburo a los parámetros de consolidación son variados, esto debido a que los autores reportan solo algunos parámetros, otros sólo concluyen que la compresibilidad del suelo se ve modificada.

Aiban (1998), Olchawa y Kumor (2008) y Kermani y Ebadi (2012) estudiaron la modificación en los parámetros de consolidación debido a la contaminación con petróleo crudo y diésel en arena fina uniforme (SP), limos de alta compresibilidad (MH), arcilla de alta compresibilidad (CH) y arcilla de baja compresibilidad (CL), concluyendo que la compresibilidad aumenta, Olchawa y Kumor (2008) y Nazir (2011) estudiando limo de alta compresibilidad (MH) y arcilla de alta compresibilidad (CH), contaminados con diésel y aceite de motor, reportan un incremento en el índice de compresión (C_c), sin embargo, Olchawa y Kumor (2008) encontraron estos resultados cuando el contenido de diésel se encuentra por encima del 3% del peso de suelo seco, mientras que, Nazir (2011) obtuvo estos resultados cuando el periodo de exposición al petróleo crudo es de 6 meses. Además Nazir (2011) reporta un incremento en el índice de recuperación (C_r).

Ijimdiya (2013) estudiando el efecto de la contaminación con aceite de motor en una arcilla de baja compresibilidad (CL) concluye que la presencia de aceite de motor condujo a un aumento en los valores de coeficiente de variación volumétrica

(M_v) y coeficientes de consolidación (C_v). Echeverri-Ramírez et al. (2015) determinaron los efectos de la contaminación con gasolina en un suelo limoso de alta compresibilidad (MH), observando en la prueba de consolidación que el contaminante promovió el colapso del suelo.

Khosravi et al. (2013) y Cabello-Suárez et al. (2017b) estudiando arcilla de baja compresibilidad (CL) y arcilla de alta compresibilidad (CH) contaminadas con diésel en ambos estudios, reportan una disminución en el índice de compresibilidad (C_c), por lo que el suelo contaminado se vuelve menos deformable. Amaziah (2010) estudiando un suelo arcilloso contaminado con petróleo crudo encontró en las pruebas de consolidación que el coeficiente de consolidación (C_v) disminuye, el proceso de consolidación de suelo se logra en un tiempo más largo en el suelo contaminado que en el suelo natural.

Khosravi et al. (2013) reportaron que en una arcilla de baja compresibilidad contaminada con diésel el índice de expansión (C_s) permanece casi constante, Liu et al. (2015) estudiando una arcilla contaminada con diésel reportan que conforme se incrementa el contenido de contaminante en el suelo natural disminuye la presión de expansión resultados contrarios a lo encontrado por Cabello-Suárez et al. (2017b) que estudiando una arcilla de alta compresibilidad reportan que el porcentaje de expansión fue mayor.

Ocampo et al. (2010) estudiaron una arena limosa (SM) contaminada con gasolina obteniendo en los ensayos edométricos que las muestras contaminadas con gasolina sin inundar muestran una mayor deformación (mayor cambio en el índice de vacíos), estos resultados son contrarios a lo encontrado por Cabello-Suárez et al. (2017b), que estudiando una arcilla de alta compresibilidad reportan que el presenta una menor disminución de vacíos al aplicar la carga de sitio comparada con la del suelo natural.

Valor de Soporte de California (CBR)

En los estudios que se reporta la modificación del Valor de Soporte de California (CBR) en el suelo debido a la presencia de algún hidrocarburo se tiene que Aiban (1998) estudiando una arena fina uniforme (SP) contaminada con petróleo crudo, el valor del CBR no se ve afectado por la cantidad de petróleo crudo, mientras que Amaziah (2010) estudiando un suelo arcillosos contaminado con petróleo crudo encontró un aumento en el parámetro del CBR cuando el suelo se encontraba contaminado, estos resultados son contrarios a lo encontrado por Pusadkar y Bharambe (2014) que reportan una disminución en el valor del CBR en un suelo arcilloso conforme aumentaba su contaminación con diésel o petróleo.

En otros estudios se tiene que Akinwumi et al. (2014) y George et al. (2015) que estudiaron un suelo arcilloso de baja compresibilidad (CH) y un suelo areno limoso (SM) contaminados con diferentes proporciones de petróleo crudo y diésel, obtuvieron que en el valor del CBR se obtuvo un aumento hasta llegar al 4% de contaminación en base al peso seco del suelo, pero disminuyo para concentraciones mayores de contaminante, Akinwumi et al. (2014) reportan estos resultados en el estudio del CBR no remojado, mientras que en el valor del CBR saturado observaron una disminución conforme aumentaba el contenido de petróleo crudo. Con lo que Akinwumi et al. (2014) concluyen que el 4% de petróleo crudo en base al peso del suelo seco es el límite para causar un efecto de lubricación en las partículas del suelo provocando que estas se deslicen fácilmente unas sobre otras.

Permeabilidad

De los estudios que reportan modificación en la permeabilidad se tiene que Rahman et al. (2010), Akinwumi et al. (2014) y Joseph y Hari (2015) que estudiaron limos de alta compresibilidad (MH), arcilla de baja compresibilidad (CL) y un suelo laterítico y una arena, contaminadas con diferentes proporciones de aceite de motor, petróleo crudo y diésel, reportan haber encontrado una disminución en la

permeabilidad de los suelos a medida que aumentaba la concentración del hidrocarburo, Akinwumi et al. (2014) atribuyen esta disminución a la reducción en el espacio poroso debido a la presencia del hidrocarburo. Martínez y López (2001) estudiando un suelo arcilloso contaminado con diferentes concentraciones de gasolina, diésel y combustóleo, reportan una disminución de la porosidad en presencia combustóleo, sin tener variación significativa con gasolina y diésel.

Amaziah (2010) y Nazir (2011) obtuvieron la permeabilidad a partir de la prueba de consolidación de en suelo arcilloso contaminado con petróleo y una arcilla sobreconsolidada clasificada como CH contaminada con aceite de motor, Amaziah (2010) reporta una disminución en el coeficiente de permeabilidad (k) para diferentes rangos de presión, mientras que Nazir (2011) reporta que la permeabilidad incremento hasta tres veces el valor de control, más allá del esfuerzo de preconsolidación, el aumento en la duración de la contaminación no tiene efecto significativo en el coeficiente de permeabilidad.

Superficie específica

Oyegbile y Ayininuola (2013) estudiando un suelo laterítico contaminado con petróleo, encontraron que el petróleo crudo creo una capa adsorbida alrededor de las partículas la cual no es soluble en agua y no se desplaza por el agua, reduciendo así el área superficial específica (SE), lo que conduce a la reducción en la fuerza de unión del suelo laterítico. Kermani y Ebadi (2012) que estudiaron una arcilla de baja plasticidad (CL) contaminada artificialmente con petróleo crudo concluyen que a medida que las partículas del suelo se cubren con aceite, el área de superficie específica disminuye. En estudios se ha demostrado que la capacidad de intercambio catiónico (CEC) de las arcillas disminuye cuando se mezclan con petróleo, lo que demuestra la reducción la SE, que conduce a una reducción en la adsorción de las partículas de arcilla de moléculas de agua y una reducción en el contacto de las partículas de arcilla.

Son pocos los estudios de suelos contaminados con hidrocarburo que obtienen la modificación en la SE del suelo, sin embargo se revisaron algunos estudios que reportan la relación de la superficie específica con la materia orgánica (MO), Barbosa Basto y Romero Cajamura (2017) realizaron un estudio de la determinación de la SE por el método de adsorción de azul de metileno de una bentonita y un caolín sometido a rangos de temperatura entre 14 y 250 °C, obtuvieron que al incrementar la temperatura de exposición en la bentonita incrementa su superficie específica, caso contrario en el caolín, que al someterlo a estos rangos de temperatura, su superficie específica disminuye.

Gelati et al. (2009) estudiaron la influencia de la materia orgánica en la superficie específica de un argiudol típico al cual se midió la superficie específica mediante la técnica de adsorción de Nitrógeno (N_2 a 77K), los resultados muestran que la SE del suelo disminuye con el incremento de la materia orgánica, y esta disminución no muestra una tendencia lineal, concluyendo que la disminución de la SE de la matriz mineral del suelo, por la adsorción de MO, depende del tipo de mineral y presenta una relación inversa con la cantidad de MO adsorbida. Lo anterior fue atribuido a una sorción preferencial en sitios reactivos tales como bordes, superficies rugosas y microporos. Después de que estos sitios han sido ocupados, una posterior sorción de MO produce menores diferencias en la SE, sugiriendo que la MO no se distribuye de manera uniforme sobre la superficie mineral, sino que se acumularía en zonas reactivas formando parches en lugar de una película continua.

Así como los estudios anteriores Burford et al. (1964); Kaiser y Guggenberger (2003); y Wagai et al. (2009) estudiaron cómo afectaba la materia orgánica en la superficie específica en diferentes suelos, encontrando que el aumento de la materia orgánica tenía una relación inversa con la superficie específica, la superficie específica disminuía con el aumento de la materia orgánica.

De las propiedades enlistadas anteriormente se pueden concluir los siguientes puntos.

- En la propiedad de gravedad específica en la mayoría de los estudios se reporta que esta disminuye, Akinwumi et al. (2014) expresan que esta disminución puede deberse a que, en general, la gravedad específica de los hidrocarburos es menor a la del agua.
- Dentro de las modificaciones observadas en la distribución de tamaño de partículas, no se presentan resultados claros, algunos autores reportan aumento en la cantidad de finos, otros reportan disminución, sin embargo se concluye que, de acuerdo a los estudios encontrados hasta ahora, esta propiedad si presenta cambios en presencia algún hidrocarburo.
- En el comportamiento de los límites de consistencia se reportan resultados variados, algunos reportan que existe una disminución general en los límites, otros reportan comportamientos variados, esto depende del tipo de suelo, del hidrocarburo y de la concentración en el suelo, así como de la metodología que se siguió para la obtención de los límites.
- En las características de compactación, la mayoría de los autores reportan haber encontrado una disminución en la máxima densidad seca cuando el suelo está contaminado y en el contenido óptimo de humedad, sin embargo, en el contenido óptimo de humedad se encuentran resultados variados en los estudios.
- En la resistencia a la compresión simple en su mayoría se reporta una disminución, algunos autores reportan un aumento cuando la cantidad de contaminante es menor al 3% en peso del suelo seco, después existe una disminución. Ijimdiya (2013) concluye que esta disminución se debe al efecto de lubricación en presencia del hidrocarburo que

conduce a la falla dentro de un periodo más corto, lo que afecta directamente la seguridad y economía dentro del diseño de obras de ingeniería.

- En la prueba de corte directo en su mayoría se reporta una disminución en la cohesión y en el ángulo de fricción interna, lo que conduce a una disminución en la resistencia al corte en los suelos debido a la presencia del hidrocarburo, Ocampo et al. (2010) mencionan que la disminución de los parámetros de resistencia al corte puede deberse a que el hidrocarburo (hidrofóbico) configura al suelo en una estructura floculada, de manera que se aumentan los vacíos y por tanto su porosidad. Este hecho implica una desestructuración del arreglo original del suelo, e influencia su comportamiento geomecánico.
- En los resultados en pruebas triaxiales realizadas en suelos contaminados con hidrocarburos, en general se reporta una disminución en la cohesión, lo que conduce a una disminución en la capacidad de carga, la resistencia al corte y el esfuerzo desviador máximo, calculados usando los parámetros obtenidos en las pruebas triaxiales.
- En los parámetros obtenidos de la prueba de consolidación, en su mayoría se reporta un aumento en la compresibilidad del suelo, del índice de compresión (C_c) y del índice de recuperación (C_r), sin embargo, existen algunos estudios que reportan una disminución en el C_c . Kermani y Ebadi (2012) concluyen que el aumento en la compresibilidad se puede atribuir a los efectos de lubricación del hidrocarburo y la reducción de la fricción entre las partículas del suelo.
- El valor de soporte de california (CBR) en la mayoría de los estudios se reportó que tiene un comportamiento descendente con el aumento en la contaminación en el suelo.

- En el parámetro de la permeabilidad en su mayoría se reporta una disminución con el aumento de la cantidad de hidrocarburo en el suelo.
- En la superficie específica se tienen pocos datos acerca de cómo se modifica en presencia del hidrocarburo en el suelo, sin embargo, los datos encontrados coinciden con que la superficie específica disminuye en presencia del hidrocarburo, así como lo hace cuando aumenta la materia orgánica en el suelo.

Las investigaciones revisadas hasta ahora acerca de las modificaciones en las propiedades del suelo debido a la contaminación con algún hidrocarburo siguen una metodología semejante para la realización de la contaminación del suelo, se ubica el sitio de muestreo, se obtiene un lote de suelo, se realiza el proceso de contaminación de manera artificial impregnando el suelo con el hidrocarburo, esto para semejar el proceso de envejecimiento del hidrocarburo en el suelo, en algunos estudios se realizó una prueba previa para definir el porcentaje de hidrocarburo que es capaz de retener el suelo y luego se les adicionó el porcentaje de hidrocarburo definido en función del peso de suelo seco, en otros no se menciona el porqué del porcentaje elegido para contaminar el suelo.

El tiempo de exposición de la muestra de suelo al hidrocarburo antes de realizar las pruebas en los estudios citados varía desde un día hasta meses, este tiempo es determinado por el investigador basándose principalmente en el alcance del estudio y lo que se desea obtener del mismo. Sin embargo, dentro de los estudios ya realizados Singh et al. (2008) reportan que la búsqueda bibliográfica mostró que los suelos secos requieren para llegar al equilibrio de 1-2 días con agua y 3-7 días con líquidos contaminantes.

Los estudios hasta ahora encontrados acerca de los efectos del hidrocarburo en las propiedades de los suelos han manifestado la importancia de continuar haciendo investigaciones para determinar los cambios a nivel de la estructura,

mineralogía, características físicas, químicas y mecánicas del suelo, debido a que han concluido que la contaminación de los suelos por hidrocarburos no sólo afecta la calidad del suelo sino que también altera sus propiedades físicas lo que conduce a problemas geotécnicos relacionados con la construcción o la estructura de cimentación en este sitio contaminado (Izdebska-Mucha y Trzciński, 2008; Ocampo et al. 2010; Rahman et al. 2010; Di Matteo et al., 2011; Nazir, 2011; Kermani y Ebadi, 2012; Ijimdiya, 2013; Joseph y Hari, 2015).

La contaminación del suelo se ha estudiado en su mayoría usando hidrocarburos como petróleo crudo, gasolina, diésel, combustóleo, keroseno, aceite de motor, entre otros.

Dentro de los resultados encontrados existen discrepancias en los cambios en las propiedades, esto es debido al tipo de suelo que se usa en la investigación, cantidad y tipo de hidrocarburo usado para contaminar, tiempo de exposición al hidrocarburo, así como las condiciones en las que se desarrollan los ensayos.

Esta falta de conocimiento es la que ha llevado a que en la Universidad Autónoma de Querétaro se hayan iniciado estudios acerca del efecto que tienen los hidrocarburos en las propiedades geotécnicas del suelo, entre los estudios realizado se encuentran Antonio Zárate (2014), Cabello-Suárez (2015), Cabello-Suárez et al. (2017a) y Cabello-Suárez et al. (2017b), encaminados a la obtención de las modificaciones en las propiedades geotécnicas y mecánicas en suelos debido a su contaminación con hidrocarburos.

1.2 Descripción del problema

Alrededor del mundo se han realizado muchos estudios encaminados a encontrar las alteraciones que sufre el suelo causado por la contaminación con hidrocarburos, esto debido a que, la producción de petróleo a nivel mundial presenta una tendencia ascendente por lo que, 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 (Rodríguez, 2017).

Los estudios de los derrames de hidrocarburos en el suelo se han realizado a nivel físico-químico y de recuperación edafológica (Antonio Zárate, 2014); sin embargo, a nivel de las propiedades geotécnicas los estudios son escasos.

La contaminación tiene efectos adversos sobre las propiedades ingenieriles de los suelos como pérdida en la capacidad de carga, asentamientos diferenciales y fracturas en estructuras existentes. Los suelos expansivos son suelos problemáticos naturalmente por lo que su contaminación aumenta su complejidad en la construcción (Sabat y Mohanta, 2017), lo que ocasiona que los trabajos de construcción en suelos contaminados aumentan el riesgo e incrementan los costos de construcción (Pradeepan et al., 2016).

Los productos petroquímicos y los combustibles pueden alterar las características de consolidación en suelo arcilloso, aumentando los asentamientos totales y/o el diferencial que pueden sufrir las cimentaciones de las estructuras causando fallas funcionales o estructurales. Las partículas de arcilla están orientadas al azar en fluidos no polares, como los hidrocarburos, causando un mayor índice de vacío y orientación paralela en fluidos polar, como el agua, lo que provoca un menor índice de vacío (Di Matteo et al., 2011).

La modificación del fluido de poro en los suelos provoca una modificación de la constante dieléctrica, lo que causa una alteración en la compresibilidad del suelo (Di Matteo et al., 2011), en los estudios revisados se ha reportado que la compresibilidad se ve modificada debido a la presencia del hidrocarburo, sin embargo no se han encontrado estudios acerca de la consolidación secundaria.

Por otro lado se tiene que los resultados encontrados acerca de la consolidación son variados, por lo que es necesario realizar más estudios para reforzar o refutar estos resultados, según sea el caso. Lo que lleva a prestar interés

en la modificación de la consolidación secundaria en los suelos contaminados y como ésta podría modificar los asentamientos en el suelo en caso de que ocurriera un derrame donde ya existen obras civiles o en caso de realizar una construcción en un suelo en el que se desconoce que se encuentra contaminado.

Por lo anterior, en este proyecto se propone estudiar el efecto que tiene la contaminación con gasolina sobre la consolidación secundaria del suelo, esto aunado a que dentro de los estudios encontrados sólo se ha estudiado el índice de compresibilidad, considerando la consolidación primaria del suelo.

1.3 Justificación

Cuando los suelos arcillosos están contaminados, la reducción de la constante dieléctrica del fluido de poro reduce la interacción físico-química en los poros de la arcilla, la cual debería dar como resultado una mayor resistencia, sin embargo, debe tenerse en cuenta que el comportamiento del suelo será diferente debido a la contaminación a largo plazo que causa cambios en el tejido de un suelo (Kermani y Ebadi, 2012). Los efectos a largo plazo en la alteración del suelo causada por la presencia del hidrocarburo que se encuentra recubriendo los granos del suelo, en ocasiones no se detectan de inmediato, por lo que los riesgos potenciales pueden tardar décadas en manifestarse con efectos de gran magnitud (Aiban, 1998; Cabello-Suárez et al., 2017a).

Hasta la fecha, la demanda de energía en el mundo se satisface principalmente mediante el uso de combustibles fósiles, esto ha provocado que las actividades de extracción, refinamiento y transporte de los hidrocarburos aumenten, provocando que el riesgo de contaminación del suelo debido a los derrames de hidrocarburos se incremente. Cuando los hidrocarburos entran en contacto con el suelo natural, el contaminante puede llegar a alterar su estructura original y con ello se modifican sus características y propiedades naturales.

Aunque han habido investigaciones sobre efectos de petroquímicos y contaminantes de hidrocarburos del petróleo sobre las propiedades de los suelos arcillosos, no existen estudios completos en la literatura acerca del comportamiento de consolidación de suelos arcillosos contaminados (Di Matteo et al., 2011). El grado y tipo de alteraciones dependerá de las características inherentes a la génesis y evolución de cada suelo y a su interacción química con la sustancia contaminante, es importante contribuir en el entendimiento de las alteraciones que puede tener un suelo contaminado y el desarrollo de métodos de ensayo que representen adecuadamente las condiciones a las que puede llegar a estar expuesto (Ocampo et al., 2010).

Los trabajos de construcción en suelos contaminados aumentan el riesgo e incrementan los costos de construcción (Pradeepan et al., 2016), los resultados de los estudios en suelos contaminados pueden usarse con fines geotécnicos y beneficiarán a los ingenieros o tomadores de decisiones en el reciclaje o la reutilización de suelos contaminados (Rahman et al., 2010).

La importancia de la consolidación secundaria en los suelos contaminados radica en el hecho de que, la consolidación secundaria es causada por un acomodo de la estructura interna del suelo, la cual se puede ver afectada por la viscosidad, la materia orgánica, la fluencia o el agua unida mediante enlace químico a las partículas de arcillas, propiedades que se ven afectadas en la presencia del hidrocarburo en el suelo.

1.4 Hipótesis y objetivos

1.4.1 Hipótesis

Los asentamientos en una arcilla expansiva obtenidos a partir de la consolidación unidimensional considerando la consolidación primaria y la consolidación secundaria del suelo aumentan debido a su contaminación con gasolina.

1.4.2 Objetivo general

- Determinar los asentamientos en una arcilla expansiva a partir de la consolidación unidimensional considerando la consolidación primaria y la consolidación secundaria del suelo.

1.4.3 Objetivos específicos

- Determinar el efecto en las propiedades geotécnicas de una arcilla expansiva provocadas por su exposición a la gasolina.
- Determinar las modificaciones que presentan los asentamientos por consolidación de una arcilla expansiva debido a su exposición a la gasolina.
- Evaluar el impacto de la presencia de gasolina en el efecto de consolidación secundaria en arcilla expansiva.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 El suelo

Los suelos son agregados de partículas minerales; junto con aire y/o agua en los espacios vacíos. Una muestra de suelo natural puede tener partículas sólidas de varios tamaños, desde grandes rocas (gravas) hasta partículas diminutas (arcillas), además de contener materiales orgánicos y componentes inorgánicos (Mitchell et al., 2005; Das, 2014).

Los suelos son recursos naturales necesarios para la existencia de los seres vivos, proporcionan alimentos, refugio, materiales de construcción, protegen el medio ambiente y brindan soporte para las obras civiles, además de que, son los materiales de ingeniería más antiguos y complejos y una gran parte de la superficie de la Tierra está cubierta por suelo (Mitchell et al., 2005; Budhu, 2011; Das, 2014).

Los suelos resultan de la meteorización física y química de las rocas y son transportados y depositados por el viento, el agua o el hielo. La meteorización física implica la reducción del tamaño sin ningún cambio en la composición original de la roca madre, los principales agentes responsables de este proceso son la exfoliación, la descarga, la erosión, la congelación y la descongelación. La meteorización química provoca tanto reducciones en el tamaño como la alteración química de la roca madre original, los principales agentes responsables de este proceso son la hidratación, la carbonatación y la oxidación (Budhu, 2011).

La composición, las propiedades y la estabilidad de los suelos pueden ser afectadas por fenómenos geoquímicos y microbiológicos, además de ser susceptibles a las influencias de los cambios de temperatura, presión, disponibilidad de agua y ambiente químico y biológico, la arcilla y la materia orgánica en un suelo generalmente influyen en las propiedades del mismo (Mitchell et al., 2005).

2.2 Suelo expansivo

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (2007) los suelos expansivos son arcillas plásticas que, por su alto contenido de minerales arcillosos, tales como montmorillonita y esmectita, experimentan grandes cambios de volumen al modificar su humedad; se caracterizan por su comportamiento cíclico de expansión y contracción al incrementar y reducir su contenido de agua, respectivamente. De modo que todos los suelos cohesivos se expanden o contraen con el cambio de humedad. En México existen suelos expansivos en: Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Baja California, Veracruz, Chiapas, Campeche, Sonora y Sinaloa.

Los principales grupos de los minerales de arcilla incluyen: caolinita, illita, montmorillonita y paligorskita (Budhu, 2011). 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, su morfología laminar y las sustituciones isomórficas. Debido a su gran superficie específica tienen una carga residual negativa y atrae las moléculas polares de agua por medio de enlaces débiles formando una capa de agua sobre el cristal. Los silicatos, cuarzos y calcitas exhiben este comportamiento (Rodríguez, 2017).

El área superficial de las arcillas por unidad de masa (superficie específica) es de hasta 1000 m² por gramo (montmorillonita). La interacción arcilla-agua junto con las grandes superficies da como resultado que las arcillas tengan mayor capacidad de retención. Las cargas superficiales en las arcillas son negativas (aniones), por lo que atraen los cationes de las moléculas del agua circundante formando una película delgada o capa de agua, llamada agua adsorbida que se une a las superficies minerales. La película fina o capa de agua se conoce como la doble capa difusa. La mayor concentración de cationes ocurre en la superficie del mineral y disminuye exponencialmente a una distancia de la superficie. El secado de suelo,

en el que es sometido a una temperatura estándar de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, no puede eliminar el agua adsorbida (Budhu, 2011).

En la Figura 2-1 se observa la doble capa difusa en el suelo, la capa interior del agua de capa doble, que se mantiene unida fuertemente por la arcilla, se conoce como agua adsorbida y es más viscosa que el agua libre (Antonio Zárate, 2014). 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.

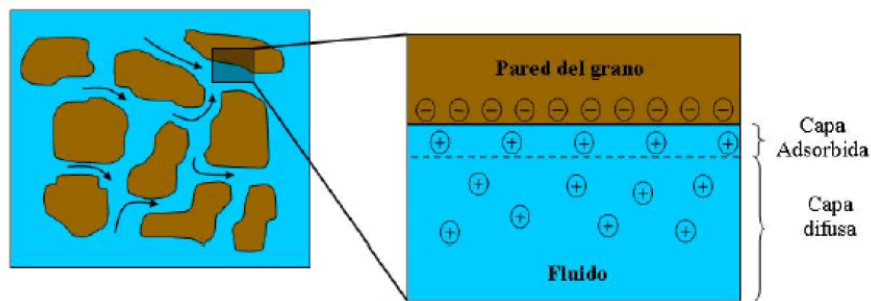


Figura 2-1 Doble capa difusa en suelos (Antonio Zárate, 2014).

El espesor de la capa difusa depende del mineral de arcilla, la caolinita tiene una doble capa difusa que es menor a la mitad de su estructura laminar; la montmorillonita tiene una doble capa difusa de hasta 20 veces mayor que su estructura, de ahí que tenga una gran plasticidad en relación con la caolinita (Rodríguez, 2017).

2.3 Físicoquímica de las arcillas

El término arcilla es aplicado para aquellas partículas con un tamaño menor a $2 \text{ }\mu\text{m}$, también se refiere a un mineral secundario o de neoformación con propiedades coloidales que causa en ella actividades físicoquímicas. Una de las propiedades más notable de la arcilla es su naturaleza coloidal, que se refiere a una

superficie específica alta y a sus características de plasticidad, adherencia, contracción, tixotropía, reopexia y entre otras, las cuales influyen directamente en su comportamiento (Besoain, 1985).

El comportamiento de las arcillas es generalmente gobernado por las fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales. La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa, la intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla, así las partículas de arcilla atraen a los iones positivos del agua y a cationes de diferentes elementos químicos. Lo que conduce a que cada partícula de arcilla se vea rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas de forma definida y ligadas a su estructura (agua adsorbida) (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005).

2.4 Capacidad de intercambio catiónico

Las partículas de arcilla tienen una carga neta negativa, para equilibrar esta carga las partículas de arcilla atraen los iones cargados positivamente de las sales en el agua intersticial. Estos se conocen como iones intercambiables. Algunos son más atraídos que otros, y los cationes se pueden organizar en una serie en términos de su afinidad por la atracción de la siguiente manera: $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > (NH_4)^+ > K^+ > H^+ > Na^+ > Li^+$ (Das, 2014).

Esto indica que, los iones de Al^{3+} pueden reemplazar a los iones Ca^{2+} , y los iones Ca^{2+} pueden reemplazar a los iones Na^+ . A este proceso se le llama intercambio de cationes. La capacidad de intercambio de cationes (CEC) de una arcilla se define como la cantidad de iones intercambiables, expresada en miliequivalentes por 100 g de arcilla seca en la Tabla 2.1 se enlistan los valores de capacidad de intercambio catiónico y de superficie específica de algunos minerales de arcilla.

Tabla 2.1 Superficie específica y capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales de arcilla (Das, 2014).

<i>Mineral de arcilla</i>	<i>Superficie específica (m²/g)</i>	<i>Capacidad de intercambio catiónico (me/100g)</i>
<i>Caolinita</i>	10-20	3
<i>Illita</i>	80-100	25
<i>Montmorillonita</i>	800	100
<i>Clorita</i>	5-500	20
<i>Vermiculita</i>	5-400	150
<i>Haloisita (4H₂O)</i>	40	12
<i>Haloisita (2H₂O)</i>	40	12

Las caolinitas son menos susceptibles a intercambiar cationes que las montmorillonita y las illitas. La capacidad de intercambio catiónico crece con la acidez del suelo, así como con la velocidad y la concentración de la solución que circule por la masa de suelo. Las propiedades mecánicas de las arcillas varían de acuerdo a los cationes adsorbidos, esto debido a que de ello depende el espesor de la película adsorbida, lo que se refleja en sus propiedades de plasticidad y resistencia del suelo (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005).

2.5 Constante dieléctrica del suelo

La constante dieléctrica del suelo (K) está dado por el valor de la constante dieléctrica del agua (80), el aire (1) y las fracciones mineral y orgánica (entre 3 y 7) presentes en el suelo (Salgado et al., 1999).

La constante dieléctrica influye en la superficie específica, así como en el espesor de la doble capa difusa, los suelos arcillosos pueden estar en contacto con diversas sustancias químicas cuando éstos son usados para revestimientos para embalses y vertederos de almacenamiento de residuos, o en el caso en que se presenten accidentalmente de derrames y fugas de aceites, solventes u otros químicos orgánicos que pueden reemplazar el agua de los poros. Las constantes

dieléctricas de estos materiales, especialmente las de los líquidos de fase no acuosa (NAPL), generalmente son mucho más bajos que los del agua (Mitchell et al., 2005).

2.6 Superficie específica

Las fuerzas que definen el comportamiento de los suelos gruesos son diferentes a los suelos finos, en los suelos finos las fuerzas eléctricas y capilares toman un papel muy importante, estas fuerzas aumentan a medida que disminuye el tamaño de partícula y aumenta la superficie específica. Los procesos físicos que gobiernan el comportamiento del suelo cambian cuando la superficie específica es mayor a $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Los suelos con mayor superficie específica experimentan sedimentación, contracción y rigidez en condiciones insaturadas y acoplamiento mecánico-químico, lo que depende de condiciones ambientales como el pH y la concentración iónica del fluido de poro (Santamarina et al., 2002).

La superficie específica determina en gran medida muchas propiedades físicas y químicas de los materiales, como son la adsorción física de las moléculas, la pérdida de calor o la ganancia resultante de esa adsorción, la expansión y contracción, entre otros, también se encuentra estrechamente relacionada a muchos procesos biológicos. Los suelos varían ampliamente en su superficie específica debido a las diferencias en la composición mineralógica y orgánica y en su distribución del tamaño de partícula, la retención y el movimiento de agua, la capacidad de intercambio de cationes y la adsorción de pesticidas. La superficie específica generalmente se expresa en metros cuadrados por gramo (m^2/g). Las partículas de tamaño arcilloso, y particularmente algunas capas de minerales de silicato, contribuyen con la mayor parte del área de la superficie inorgánica a los suelos, en consecuencia, los tipos de minerales presentes en el suelo determinan en gran medida la superficie específica del suelo y las propiedades relacionadas (Carter et al., 1986).

El propósito de las mediciones de la superficie específica es comúnmente determinar la accesibilidad de las superficies internas del complejo mineral de arcilla a moléculas o iones que se pueden adsorber en ellas. Esta accesibilidad generalmente está determinada por las fuerzas de adsorción relativas de las moléculas o iones introducidos a las superficies minerales de arcilla en comparación con las fuerzas de atracción entre las plaquetas minerales de arcilla adyacentes. Los sistemas de mayor interés general son los sistemas hidratados. Por consiguiente, comúnmente se desea un procedimiento de medición que estima el área de superficie que sería accesible en condiciones hidratadas (Carter et al., 1986).

2.6.1 Mediciones de absorción de azul de metileno.

El colorante azul de metileno (AM) se ha utilizado para determinar el área de superficie de los minerales de arcilla, la fórmula química es $C_{16}H_{18}ClN_3S$, con un peso molecular correspondiente de 319.87 g/mol. El azul de metileno en solución acuosa es un colorante catiónico, $C_{16}H_{18}N_3S^+$, que absorbe las superficies de arcilla cargadas negativamente. Por lo tanto, la superficie específica de las partículas se puede determinar por la cantidad de azul de metileno absorbido. El área de superficie cubierta por una molécula de azul de metileno se asume típicamente que es 130 \AA^2 ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$) (Santamarina et al., 2002).

Dentro de las técnicas para la medición de la superficie específica, comúnmente la de adsorción de gases y la adsorción de azul de metileno, la adsorción de gases no es una técnica recomendada para medir la superficie específica en suelos expansivos, debido a que la prueba se realiza en el suelo en condiciones secas por lo que las partículas se encuentran estrechamente unidas, lo que genera que el gas no penetre en las capas intermedias y da como resultado valores más bajos de superficie específica (Santamarina et al., 2002).

2.6.2 Desventajas de la prueba de azul de metileno

La molécula de azul de metileno tiene forma rectangular con dimensiones aproximadas de 17 Å X 7.6 Å X 3.25 Å, por lo que su unión a la superficie mineral puede ser en diferentes orientaciones, variando los resultados del área cubierta de azul de metileno si (Santamarina et al., 2002):

- La molécula se encuentra en su superficie más grande que la superficie bajo estudio, el área cubierta es de aproximadamente 130 Å² por molécula.
- La molécula está inclinada (65-70°) con respecto a la superficie en estudio, el área cubierta es de aproximadamente 66 Å² por molécula;
- El eje más largo está orientado perpendicular a la superficie, el área cubierta es de aproximadamente 24.7 Å² por molécula.

La cantidad de absorción aumenta con el área de superficie y la densidad de carga de la superficie, que se ve afectada por el pH y la concentración iónica. Además, la absorción implica el reemplazo de iones, que depende en gran medida de la valencia, el tamaño y la concentración relativa de los iones. Los resultados de las pruebas muestran que los cationes AM reemplazan a Na⁺ más que a Fe³⁺ y Al³⁺, por lo tanto, el uso del AM produce valores de superficie específicos más altos para Na-montmorillonita en comparación con Fe-montmorillonita y Al-montmorillonita. De manera similar, el exceso de sales en la solución no solo altera la carga efectiva de la superficie, sino que también compite con el azul de metileno para ser absorbido en la superficie. La disolución de CaCO₃ y partículas de arcilla puede influir en la precisión de las mediciones. Además, la precisión de este método está limitada por el tamaño de los adsorbatos. Los errores relacionados con el operador al juzgar el punto final pueden causar un error de ±10% (Santamarina et al., 2002).

2.6.3 Isotermas de Langmuir

Las isotermas de adsorción son la representación gráfica de la relación entre la cantidad adsorbida por una unidad de peso de adsorbente y la concentración de adsorbato restante en un medio de ensayo a una temperatura constante bajo condición de equilibrio. La isoterma de adsorción de Langmuir describe la superficie como homogénea asumiendo que todos los sitios de adsorción tienen igual afinidad con el adsorbato y que la adsorción en un punto no afecta la adsorción en el punto adyacente. Se presenta en la ecuación (2-1) (Albis et al., 2017):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q^0 b} + \frac{1}{Q^0} C_e \quad (2-1)$$

Dónde: C_e : concentración de equilibrio del adsorbato (AM) (mg/L); q_e : es la cantidad de adsorbato adsorbido por unidad de masa de adsorbato (mg/g); Q^0 : capacidad de adsorción de monocapa (mg/g); b : recíproco de la concentración a la que se alcanza la mitad de la saturación del adsorbente. Al graficar C_e/q_e en función de C_e , se obtiene una línea recta con pendiente $1/Q^0$ (Giraldo et al., 2008).

La isoterma de adsorción de Langmuir, es característica de sólidos con una gran cantidad de microporos. En estas isotermas se puede ver que hay un aumento en la cantidad de azul de metileno adsorbida con el incremento de la concentración hasta llegar a un punto de saturación, en el cual el aumento de la concentración no causa un incremento significativo (Giraldo et al., 2008).

2.7 Consolidación de suelo

Bajo cargas, todos los suelos presentarán un cambio volumétrico, provocando el asentamiento de estructuras cimentadas sobre ellos. Si el asentamiento no se mantiene en un límite tolerable, el uso deseado de la estructura puede verse afectado y la vida útil de diseño de la estructura puede verse reducida (Budhu, 2011). Los cambios de volumen en los suelos son inducidos por la

modificación en las tensiones aplicadas, los entornos químicos, humedad y la temperatura. La relación de vacíos del suelo, usada para determinar los cambios volumétricos, se encuentra relacionada con el tamaño de grano y la forma (lo que determina la superficie específica), así como con la plasticidad (Mitchell et al., 2005). La compresión es causada por a) deformación de las partículas del suelo, b) reacomodo de las partículas del suelo, y c) expulsión de agua o aire de los espacios vacíos (Das, 2001).

Cuando una capa de suelo está sometida a un esfuerzo exhibirá una cierta compresión, esta compresión se logra cuando al aplicar una carga los sólidos del suelo se reorganizan o cuando ocurre extrusión de aire y/o agua de los poros. De acuerdo a Terzaghi, "una disminución del contenido de agua de un suelo saturado sin reemplazo del agua por aire se denomina proceso de consolidación". Cuando los suelos arcillosos saturados se someten a una esfuerzo la presión intersticial del agua aumentará inmediatamente, pero debido a la baja permeabilidad del suelo, se requiere de algún tiempo para que se equilibre el esfuerzo aplicado y la presión intersticial, cuando ocurre la total extrusión del agua y el sistema se equilibra el fenómeno se le denomina consolidación (Das, 2014).

Se pueden efectuar pruebas de laboratorio en muestras de arcilla saturada (ASTM Test Designation D-2435) para determinar el asentamiento por consolidación ocasionado por varias cargas incrementales. Con los datos de la prueba se elabora un gráfico que muestre la variación de la relación de vacíos e (en escala aritmética) al final de la consolidación contra el esfuerzo vertical efectivo correspondiente σ' (en escala logarítmica), como se muestra en Figura 2-2 (Das, 2012).

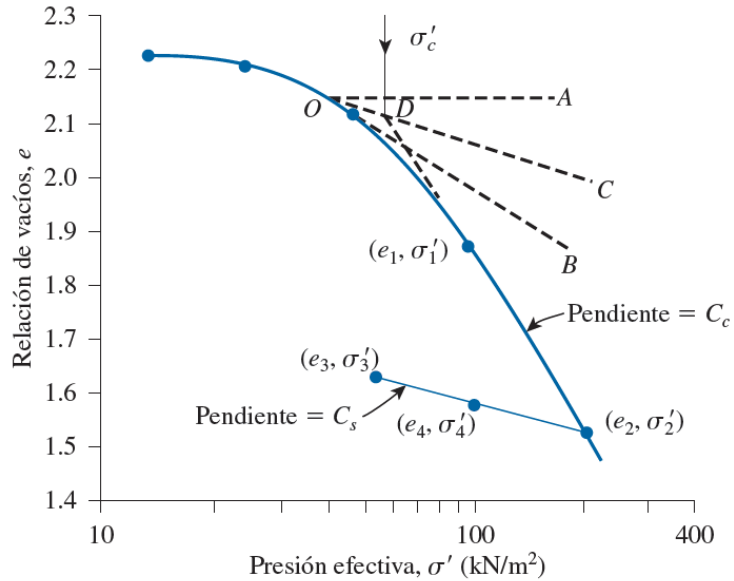


Figura 2-2 Curva e-log σ' para una arcilla suave del este de San Louis, Illinois (Das, 2012).

A partir de la curva e-log σ' se pueden determinar tres parámetros necesarios para el cálculo de asentamientos, presión de pre-consolidación σ'_c , índice de compresión (C_C) y el índice de expansión (C_S) como se puede observar en la Figura 2-2 (Das, 2012).

La presión de preconsolidación, σ'_c , es la presión de sobrecarga máxima después de la efectiva a la que se ha sometido la muestra de suelo. El índice de compresión, C_C , es la pendiente de la línea de consolidación normal. Índice de descarga o índice de expansión, C_S , es la pendiente promedio de las curvas de descarga (Budhu, 2011; Das, 2012).

2.8 Asentamientos por consolidación primaria

La consolidación primaria es el cambio en el volumen de un suelo de grano fino causado por la expulsión de agua de los vacíos y la transferencia de estrés del exceso de agua intersticial a las partículas del suelo (Budhu, 2011).

El asentamiento por consolidación primaria unidimensional (ocasionado por una carga adicional) de una capa de arcilla con un espesor H_c se calcula siguiendo la ecuación (2-2) (Das, 2012):

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad (2-2)$$

Donde:

S_c = Asentamientos por consolidación primaria.

C_c = Índice de compresión.

H_c = Espesor del estrato.

e_0 = Relación de vacíos in situ.

σ'_0 = Esfuerzo vertical efectivo promedio sobre la capa de arcilla.

$\Delta\sigma'$ = Presión agregada.

2.9 Asentamientos por consolidación secundaria

La consolidación secundaria es el cambio en el volumen de un suelo de grano fino causado por el ajuste de la estructura interna del suelo después de que se ha completado la consolidación primaria (Budhu, 2011).

El asentamiento por consolidación secundaria se calcula basándose en el gráfico de deformación expresada en términos de la relación de vacíos contra el logaritmo del tiempo, que se muestra en la Figura 2-3, la consolidación secundaria es prácticamente lineal.

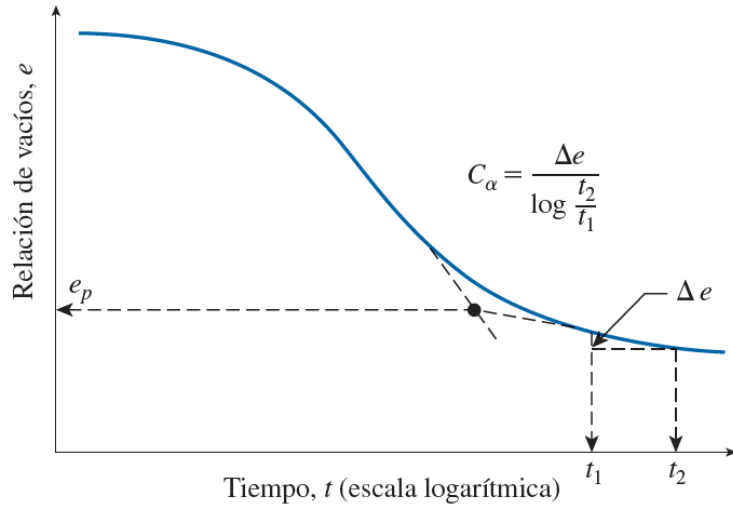


Figura 2-3 Variación de e con $\log t$ ante un incremento de carga, y definición del índice de compresión secundaria (Das, 2012).

Con base a la Figura 2-3 el índice de compresión secundaria se calcula basándose en la ecuación (2-3):

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log \left(\frac{t_1}{t_2} \right)} \quad (2-3)$$

Donde:

C_{α} = Índice de compresión secundaria.

Δe = Cambio en la relación de vacíos.

t_1, t_2 = Tiempo.

La magnitud de consolidación secundaria se puede calcular con la ecuación (2-4):

$$S_{c(s)} = C_{\alpha} H_c \log \left(\frac{t_1}{t_2} \right) \quad (2-4)$$

El asentamiento por consolidación secundaria es más importante en el caso de todos los suelos orgánicos y suelos inorgánicos altamente compresibles. Existen varios factores que pueden afectar la consolidación secundaria que aún no han sido comprendidos con claridad como la cantidad y el tipo de materia orgánica, la influencia de la modificación del fluido de poro, la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos, la modificación del pH, entre otros (Das, 2012).

2.10 Suelo contaminado

De acuerdo a la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2014) en el *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* definen los sitios contaminados como “el lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas”.

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

Un suelo contaminado es todo aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que genere un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los estándares que se determinen por el Gobierno. Los suelos contaminados pueden tener efectos muy diversos, desde el riesgo tóxico para la salud humana hasta pérdidas de recursos naturales y económicos. Los efectos causados por los suelos contaminados son en general a largo plazo y en ocasiones las consecuencias no se detectan de inmediato

por lo que los peligros potenciales pueden tardar décadas en manifestarse con efectos de gran magnitud (Sabroso y Pastor, 2004).

2.11 Transporte y movilidad de los hidrocarburos en el suelo

Los hidrocarburos sólidos en fase no acuosa más ligeros que el agua (LNAPLs) son aquellos que tienen una densidad menor a la del agua, por ejemplo: los derivados del petróleo, la gasolina, el diésel, compuestos como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno. Su transporte y movilidad en el subsuelo depende de (Huaiquilaf, 2009):

- Las propiedades del hidrocarburo, como la densidad, viscosidad, solubilidad, presión de vapor, volatilidad y tensión interfacial.
- Las características del suelo en que se propagan, como fuerza o presión capilar, distribución del tamaño de poros y contenido inicial de humedad, estructura geológica de los estratos, y velocidad del agua subterránea.
- Funciones dependientes de la saturación, como saturación residual y permeabilidad relativa.
- Las vías preferentes de migración, como fracturas o canales de disolución.

Cuando ocurre un derrame de hidrocarburo en un estanque de almacenamiento subterráneo, éste comienza a lixiviarse hacia el acuífero bajo la acción de la gravedad; a medida que el hidrocarburo avanza una parte de éste, va quedando retenido en los poros y fracturas del suelo debido a las fuerzas capilares (Huaiquilaf, 2009).

Cuando el suelo se encuentra contaminado, las fases que normalmente se conocen cambian, en la Figura 2-4 se muestra la configuración que adquiere el

suelo en presencia del hidrocarburo y en la Figura 2-5 se muestra como se presenta el hidrocarburo en los granos del suelo de acuerdo a Amaziah (2010).

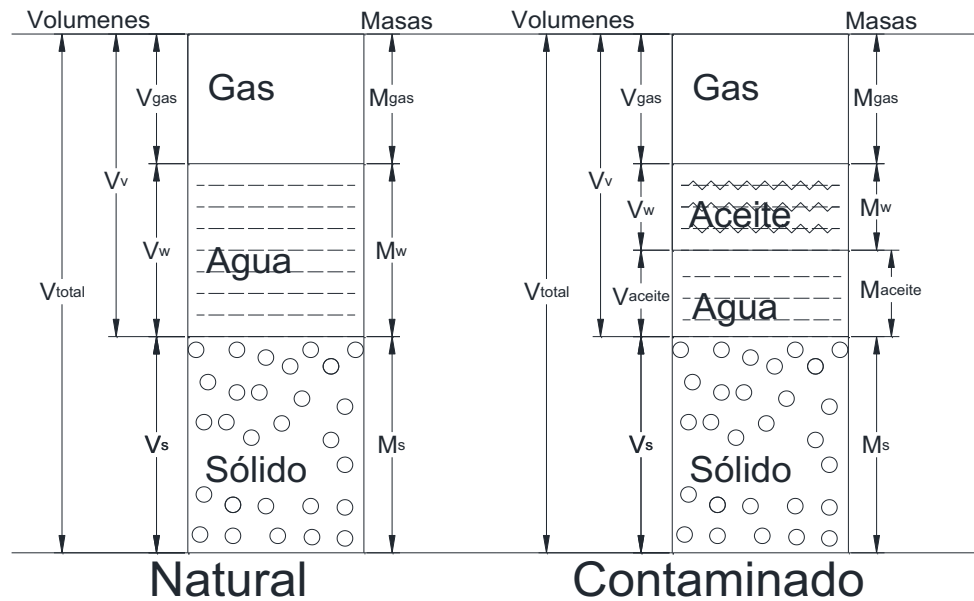


Figura 2-4 Fases del suelo contaminado y no contaminado de acuerdo a Amaziah (2010)
(Elaboración propia).

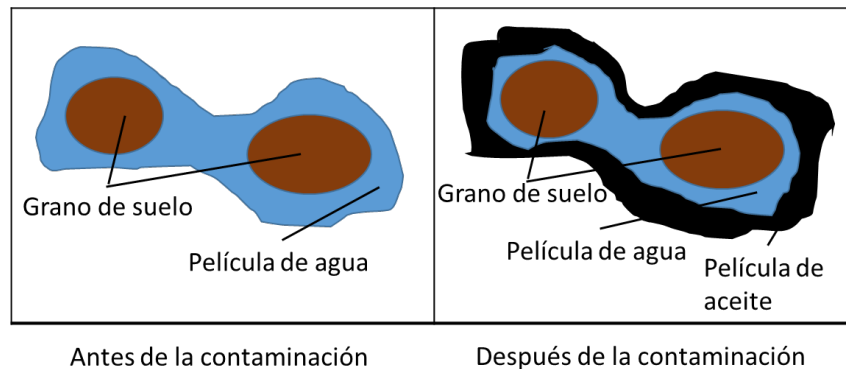


Figura 2-5 Visualización de los granos del suelo antes y después de la contaminación Amaziah (2010) (Elaboración propia).

2.12 Gasolina

El petróleo está compuesto por varias fracciones, la fracción más volátil que contiene alcanos de 1-10 átomos de carbono se utiliza como combustible en el gas natural y la gasolina. La fracción de aceite lubricante contiene gran cantidad de alcanos de cadenas larga ($C_{20}-C_{34}$), con puntos de fusión alto. La gasolina se obtiene en un rango de temperatura que va de 40 a 205 °C y contiene hidrocarburos de 5 a 12 átomos de carbono. La gasolina es considerada el producto principal en las refinerías mexicanas, la cual representa un 32% de su producción, lo que es equivalente a 16 millones de litros por día, la Tabla 2.2 muestra la composición de la Gasolina Magna Mexicana (Vázquez, 1999).

Tabla 2.2 Composición de la gasolina magna comercial mexicana (Vázquez, 1999).

Componentes	Porción %
Benceno	1
Compuestos oxigenados	10
Compuestos aromáticos	20
Compuestos saturados	56
Olefinas	13

La gasolina es la mezcla de hidrocarburos líquidos volátiles e inflamables obtenidos del petróleo crudo; se produce a través de varios procesos de destilación fraccionada de petróleo, la condensación o la adsorción de gas natural, la descomposición térmica o catálica de petróleo o sus fracciones, la hidrogénesis de gasógeno o carbón, o a través de la polimerización de hidrocarburos de bajo peso molecular (Vélez y Suárez, 2017).

De acuerdo a la Hoja de Datos de Seguridad de PEMEX (2011) la gasolina Pemex-Magna es una mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena recta y ramificada, olefinas, cicloparafinas y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Se utiliza como combustible en motores de combustión interna y es para uso en el

interior del país, tiene una temperatura de ebullición de entre 60-70 °C, un color rojo, su estado es líquido y su gravedad específica a 20 ± 4 °C es de 0.70 a 0.77.

Como ya se observó el comportamiento físico y mecánico de las arcillas depende en gran medida de procesos químicos, dentro de los estudios encontrados; Oyegbile y Ayininuola (2013) que estudiaron la influencia del petróleo crudo en la resistencia al corte de un suelo laterítico reportaron una disminución en los valores de los límites de Atterberg, lo que atribuyeron a la alteración de los enlaces cohesivos y las fuerza que existen entre de las partículas del suelo y a la reducción de la capacidad de intercambio catiónico (CEC), las partículas del suelo se encuentran cubiertas por las moléculas de petróleo lo que inhibe el intercambio, reduciendo así la capacidad de las partículas lateríticas del suelo para unirse entre sí.

De la misma forma Kermani y Ebadi (2012) que estudiaron una arcilla de baja plasticidad (CL) contaminada con petróleo crudo expresaron que, como ya se ha demostrado en diversos estudios, la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas disminuye cuando se mezclan con petróleo, lo que lleva a una disminución en la superficie específica de las arcillas, que conduce a una reducción en la adsorción de las partículas de arcilla de moléculas de agua y una reducción en el contacto de las partículas de arcilla, lo que consecuentemente conduce a una reducción en la cohesión, provocado así modificación en las propiedades mecánicas del suelo debido a procesos químicos que se presentan cuando cambia el fluido de poro.

Estudiando la compresibilidad de una arcilla caolinita contaminada con gasolina Di Matteo et al. (2011) reportaron que la compresibilidad de la caolinita aumenta conforme aumenta la porción de gasolina en el suelo, esto es debido a que con fluidos no polares la compresibilidad es altamente sensible al valor de la constante dieléctrica, por lo tanto, el comportamiento del índice de compresión se debe a la modificación de las fuerzas de atracción de van der Waals o cambios en

el tejido del suelo. De la misma forma Olchawa y Kumor (2008) atribuyen el aumento de los valores del índice de compresibilidad de suelos orgánicos contaminados con diésel a la disminución en la constante dieléctrica, de la mezcla agua-diésel formada en el medio poroso. La disminución de la constante dieléctrica del medio poroso reducirá el espesor de la capa difusa y, por lo tanto, disminuirá la porosidad del sistema.

Los estudios encontrados hasta ahora, solo hablan de índices de compresibilidad, o de asentamientos sin especificar ni reportar si se obtienen considerando solo la consolidación primaria o si también se observa la consolidación secundaria.

3. METODOLOGÍA

3.1 Localización del sitio de muestreo

La selección del sitio de muestreo se hizo basándose en los objetivos planteados y en la disponibilidad de sitios de muestreo. Para el logro de los objetivos se necesita un suelo expansivo, Zepeda (1987), Zepeda y Castañeda (1987), y Galaviz-González (2013), en sus trabajos definieron que en la ciudad de Querétaro existen suelos de origen volcánico que se caracterizan por ser suelos expansivos, en el fraccionamiento de Jurica se ha encontrado la presencia de este tipo de suelos. Por lo que el muestreo se realizó en el fraccionamiento Jurica que se encuentra ubicado a $20^{\circ}38'11''$ de latitud Norte y $100^{\circ}22'47''$ de longitud Oeste, en la Figura 3-1 se muestra el sitio de muestreo.



Figura 3-1 Ubicación geográfica del sitio de muestreo (Google Earth, 2018).

3.2 Muestreo del lote

El lote de suelo se obtuvo siguiendo el procedimiento estandarizado en la NMX-C431-ONNCCE-2002, se realizó un pozo a cielo abierto (PCA) hasta la profundidad en que se pudo observar que se encontraba el estrato arcilloso, se tomaron muestras alteradas de arcilla en costales a una profundidad de 2.75 m, una muestra inalterada, para obtener las propiedades naturales del suelo y muestras en bolsas de plástico de un kilogramo aproximadamente tomar la humedad natural del suelo, las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro. El muestreo se realizó en abril del 2017. Es necesario puntualizar que se tiene el conocimiento de que el sitio de muestreo no se encuentra contaminado, ni fue contaminado durante la presente investigación.

3.3 Propiedades geotécnicas del suelo natural

Después del traslado del lote de suelo al laboratorio se secó al aire libre y se disgregó para eliminar los terrones de suelo, se homogenizó y cuarteo antes de empezar a trabajarlo. Para la caracterización del suelo natural se llevaron a cabo pruebas de laboratorio basándose en los procedimientos de las normas vigentes para la obtención de propiedades como el contenido de humedad (ω), la masa volumétrica de la muestra (γ_m), gravedad específica (G_s), límites de consistencia (límites de Atterberg) y análisis granulométrico, por tamices y por método del hidrómetro.

3.3.1 Contenido de humedad

Siguiendo el procedimiento estandarizado en la norma ASTM D 2216-10 “Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass”, que especifica el método a seguir para la obtención del contenido de humedad del suelo, se usó la muestra obtenida en el muestreo, en un recipiente (flanera) con masa conocida, se coloca una cantidad de suelo húmedo,

masa conocida, se somete a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un periodo mínimo de 16 horas, o hasta que su peso del suelo sea constante, se pesa el suelo después de secado, con estos datos se obtiene el contenido de agua en porcentaje con base en la masa del suelo con la ecuación (3-1).

$$\omega = \frac{W_{\text{cont+suelo húm}} - W_{\text{cont+suelo seco}}}{W_{\text{cont+suelo seco}} - W_{\text{cont}}} \times 100 = \frac{W_{\text{agua}}}{W_{\text{suelo seco}}} \times 100 \quad (3-1)$$

Donde:

ω = Contenido de agua, %,

$W_{\text{cont+suelo húm}}$ = Masa del contenedor más suelo húmedo, g,

$W_{\text{cont+suelo seco}}$ = Masa del contenedor más suelo seco, g,

W_{cont} = Masa del contenedor, g,

W_{agua} = Masa del agua $W_{\text{agua}} = W_{\text{cont+suelo húm}} - W_{\text{cont+suelo seco}}$, g,

$W_{\text{suelo seco}}$ = Masa de las partículas solidad $W_{\text{suelo seco}} = W_{\text{cont+suelo húm}} - W_{\text{cont}}$, g.

3.3.2 Masa volumétrica de la muestra

La masa volumétrica de la muestra se obtuvo usando el procedimiento del mercurio, como se explica en la norma ASTM D 427-98. Usando la muestra inalterada obtenida en el muestreo se tomaron tres muestras cubicas de aproximadamente 3 cm por lado, se pesó la muestra húmeda, se llenó una flanera de mercurio cuidando que esta quedara bien llena con ayuda de una placa enrasadora de vidrio. Se coloca la flanera dentro de un fondo y en la flanera se coloca la muestra de suelo, sobre el fondo caerá el mercurio removido por la muestra de suelo. Usando el peso del mercurio desalojado y su densidad, se obtendrá el volumen del suelo. Con el peso de la muestra y el volumen se obtiene la masa volumétrica, así como las propiedades volumétricas y gravimétricas como

la relación de vacíos, el grado de saturación y la porosidad del suelo en su estado natural.

3.3.3 Gravedad específica

Siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 128-12 “Standard Test Method for Density, relative density (Specific Gravity), and absorption of fine Aggregate” se obtuvo la gravedad específica o densidad relativa de sólidos del suelo. Una masa de suelo se secó al horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un día, se obtuvo una muestra seca de suelo, mínimo de 50 g, la que se saturó durante un día, se colocó en un matraz al que previamente se le realizó la calibración del peso del matraz a diferentes temperaturas con agua destilada, se realizó la extracción de aire de la muestra en el matraz con agua destilada sometiéndolo a baño maría a una temperatura de 80°C y haciendo la extracción de aire con una bomba de vacío. Después de la extracción del aire se deja reposar el matraz hasta que llegue a una temperatura de 20°C , se afora a la marca de calibración y se pesa el matraz, con suelo y agua. Con estos datos y la curva de calibración del matraz se obtiene la gravedad específica del suelo. Si no es posible que el matraz llegue a los 20°C se tendrá que realizar una corrección por temperatura, la gravedad específica se calcula con la formula (3-2).

$$G_t = \frac{W_{ss}}{W_{m+w} + W_{ss} - W_{m+w+s}} \quad (3-2)$$

Donde:

G_t = Gravedad específica a cierta temperatura cercana a los 20°C , adimensional,

W_{ss} = Masa del suelo seco, g,

W_{m+w} = Masa del matraz más agua, hasta la marca de calibración, g,

W_{m+w+s} = Masa del matraz más agua, más suelo, hasta la marca de calibración, g.

Si en el ensaye no fue posible tener el peso a 20°C se hace la corrección por temperatura con la ecuación (3-3).

$$G_s = k \times G_t \quad (3-3)$$

Donde:

G_s = Gravedad específica a 20°C, adimensional,

k = Coeficiente de temperatura del agua, adimensional.

3.3.4 Límites de consistencia

Se obtuvieron el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4318-10 “Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils”. De la muestra inalterada se tomó suelo, se secó al aire libre y se cribó por la malla No. 40. Se tomó una muestra de suelo de aproximadamente 500 g que pasara la malla No. 40, se le agregó agua destilada hasta que fuera manejable se movió el suelo con una espátula cuchillo, se dejó reposar un día. Al día siguiente se mezcló el suelo y se procedió a obtener el límite líquido con la copa Casagrande, se colocaba el suelo en la copa, se realizó la ranura y se acciono la copa, deteniendo al momento en que el suelo se junta, se registra el número de golpes con el peso del suelo húmedo que posteriormente se somete a un proceso de secado. El límite líquido es el contenido de humedad en el que el suelo fluye a los 25 golpes repetidos por la copa Casagrande. El límite plástico se obtiene haciendo rollitos de aproximadamente 3 mm de diámetro y corresponde al contenido de humedad del suelo cuando se agrieta y ya no es posible presionarlo. El índice de plasticidad corresponde a la resta del límite líquido menos el límite plástico.

Con el límite líquido y el índice plástico se obtiene la clasificación del suelo usando una tabla del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

3.3.4.1 Límite de contracción y contracción lineal

El límite de contracción y la contracción lineal se obtienen siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 427-98 “Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method”. Del suelo con un contenido de humedad igual al límite líquido se llena una cápsula petri y un molde de contracción lineal cuidando que no queden vacíos, se pesa la cápsula petri con el suelo húmedo, después se someten a secado, cuidando que las muestras no se fracturen. Se calcula el límite de contracción con la ecuación (3-4).

$$LC = \omega - \left[\left(\frac{V - V_0}{W_0} \right) * 100 \right] \quad (3-4)$$

Donde:

LC= Límite de contracción en porcentaje, %,

ω = Contenido de humedad igual al límite líquido en porcentaje, %,

V= Volumen inicial de la muestra, cm³,

V₀= Volumen final, después del proceso de secado, cm³,

W₀= Masa suelo seco, g.

3.3.5 Análisis granulométrico

Debido a que se está trabajando con un suelo que se sabe que tiene en su mayoría finos, la granulometría se realizó haciendo primero el proceso de lavado de suelo que viene descrito en la norma ASTM D 1140-00 “Standard test methods for amount of material in soils finer than No. 200 (75 μ m) sieve”, tomando una muestra de suelo el que se lavó por la malla No. 200, al material que se retuvo en la malla No. 200 se le realizó granulometría mediante tamices siguiendo el procedimiento de

la norma ASTM C 136-06 "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregate", obteniendo el porcentaje retenido en cada malla, el material que paso la malla No. 200 se recolecto, se secó y se realizó a prueba del hidrómetro descrita en la norma ASTM D422-07 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils". Con los datos obtenidos se graficó la curva granulométrica usando el diámetro de partícula contra el porcentaje que pasa.

3.4 Contaminación del suelo con gasolina

Previo a la contaminación el suelo se secó al aire libre y se disgregó, después se secó en un horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante tres días para asegurar que el suelo se seicara, este proceso se realizó para semejar el envejecimiento del suelo y estudiar la condición más crítica, que sería cuando el suelo adsorbiera la mayor cantidad de gasolina que es capaz de adsorber, si el suelo se encontrara húmedo al momento de contaminarlo, quizás el suelo retendría menos gasolina, esto debido a la afinidad que tiene el suelo por el agua.

El suelo se contamina en Julio del 2017 con un porcentaje equivalente a su humedad natural, esto con el propósito de asemejar las condiciones naturales. Se homogenizó y se dejó reposar durante 9 meses para simular el envejecimiento del contaminante en el suelo, en bolsas de plástico para evitar lo más posible la volatilización de la gasolina. Después del tiempo transcurrido se observó que la mayor parte de la gasolina se volatilizó, por lo que se realizaron algunas pruebas para calcular el porcentaje de gasolina retenido en el suelo, teniendo el conocimiento de la gasolina retenida en el suelo, se procedió a obtener las propiedades geotécnicas mismo.

3.5 Propiedades geotécnicas del suelo contaminado

La caracterización geotécnica del suelo contaminado se hizo buscando seguir lo más que fuera posible los procedimientos de las normas vigentes, se

obtuvo el porcentaje de gasolina retenido, la gravedad específica (G_s), límites de consistencia (límites de Atterberg) y análisis granulométrico, por tamices y por método del hidrómetro. Debido a que con los recursos que se cuentan no es posible trabajar en un ambiente en el que se evite la volatilización de la gasolina, y no se puede controlar las pérdidas, se usó agua para obtener las propiedades del suelo teniendo como dato previo el porcentaje de gasolina retenido.

3.5.1 Obtención del porcentaje de gasolina retenido

Para calcular el porcentaje de gasolina retenido se usaron varios métodos de los cuales se compararon los resultados, a continuación se hace una breve descripción de los métodos usados.

Siguiendo el procedimiento estandarizado en la norma ASTM D 2216-10 “Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass”, que especifica el método a seguir para la obtención del contenido de humedad del suelo, después del tiempo de envejecimiento definido se tomó una muestra de suelo y se sometió a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, la cantidad de gasolina obtenida mediante este método será la cantidad de gasolina teórica, este dato servirá para cálculos posteriores, ya que, en los métodos estandarizados el suelo se somete a este proceso para ser secado, sin embargo de acuerdo a Vázquez (1999) la gasolina se volatiliza a una temperatura de 210°C aproximadamente.

Sometiendo al suelo a una temperatura de $210^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, como se observó en el capítulo 2 en el apartado 2.12 de acuerdo a Vázquez (1999) la gasolina se obtiene en un rango de temperatura de 40 hasta 205°C , por lo que se considera que sometiendo al suelo a esta temperatura el total de gasolina se volatizará.

La técnica de análisis termogravimétrico (TGA), realizada en el equipo de TGA Q500 fabricado por TA instruments, se llevó a cabo en una atmósfera de nitrógeno y con una velocidad de calentamiento de $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. El suelo

contaminado se tritura, se toma una muestra menor a 50 mg que pase por la malla No. 200 la cual es sometida a aumentos de temperatura controlados con respecto al tiempo y se mide la cantidad de masa perdida de un material en función de su temperatura bajo condiciones controladas, la masa perdida hasta los 210°C se considerara como la cantidad de gasolina del suelo.

Con los datos obtenidos de la gravedad específica del suelo natural y la gravedad específica del suelo contaminado, considerando la gravedad específica del suelo contaminado como la del suelo y la gasolina y usando como datos el peso volumétrico de la gasolina.

3.5.2 Gravedad específica

La gravedad específica se obtuvo de dos formas, en una muestra de suelo contaminado secado al horno durante un día a 110°C ± 5°C y con el suelo contaminado sin someterlo a secado tomando en cuenta el dato del contenido de gasolina retenido, después se trabajó el procedimiento descrito en la norma ASTM C 128-12 “Standard Test Method for Density, relative density (Specific Gravity), and absorption of fine Aggregate”, para obtener la gravedad específica. En los cálculos el peso del suelo contaminado secado al horno se consideró como peso del suelo seco, en el caso en el que el suelo no se secó, el peso del suelo seco se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$W_{ss} = \frac{W_{cont}}{1 + \left(\frac{\omega_{HTP}}{100}\right)} \quad (3-5)$$

Donde:

W_{ss} = Masa del suelo seco, g,

W_{cont} = Masa del suelo contaminado, g,

ω_{HTP} = Contenido de gasolina en porcentaje en función del peso de suelo seco, %.

Esta ecuación se obtuvo basándose en la ecuación usada para el cálculo del contenido de humedad del suelo, después de tener el peso del suelo seco la gravedad específica se calculó con las ecuaciones ya señaladas en el apartado 3.3.3.

3.5.3 Límites de consistencia

Se obtuvieron el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4318-10 "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils" como se describió en el apartado 3.3.4. Durante el proceso se buscó tener un control en el agua a agregar al suelo, para identificar si existía pérdida de peso de la muestra por adición de agua. De la misma forma el límite líquido corresponde al porcentaje de humedad cuando fluye el suelo en la copa Casagrande a los 25 golpes, el límite plástico cuando los rollitos de 3 mm de diámetro presentan agrietamiento y el índice de plasticidad corresponde a la resta del límite líquido menos el límite plástico, sin embargo, el contenido de humedad calculado en los límites no corresponde solo a agua, corresponde a agua más el contaminante retenido ya antes calculado, por lo que en los límites se obtuvo la cantidad de agua necesaria para el límite líquido y el límite plástico con cierta cantidad de contaminante inicial.

Con el límite líquido y el índice plástico se obtiene la clasificación del suelo usando la tabla del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

3.5.3.1 Límite de contracción y contracción lineal

El límite de contracción y la contracción lineal se obtienen siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 427-98 "Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method". Se tomó suelo del ensaye de límites de consistencia cuando éste ya tiene un contenido del fluido del límite líquido y se realizó el procedimiento descrito en el apartado 3.3.4.1.

3.5.4 Análisis granulométrico

Se tomó una cantidad de suelo contaminado y se realizó el análisis granulométrico como se describió en el apartado 3.3.5. El peso del suelo se obtuvo restándole el peso correspondiente al porcentaje de contaminante al suelo lavado. Con los datos obtenidos se realizó la curva granulométrica graficando el diámetro de partícula contra el porcentaje que pasa.

3.6 Obtención del pH

Se obtuvo el pH del suelo natural y del suelo contaminado siguiendo el proceso descrito en la norma ASTM D 4972-01 "Standard Test Method for pH of Soils". La evaluación del pH se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensible al H⁺. En el caso de los suelos el pH se mide con el potenciómetro en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación suelo: agua 1:2 (Bernal Cortés, 2015).

Para la obtención del pH se pesan 10 g de suelo, ya sea natural o contaminado, que pasa la malla No. 200, no es necesario que el suelo se encuentre seco, se agregan 20 g de agua destilada, se introduce en la mezcla la barra de agitación y se agita durante 30 minutos a intervalos de 5 minutos de agitación y 5 minutos de reposo, pasado los 30 minutos agitar 5 minutos nuevamente y dejar reposar 15 minutos. Antes de medir el pH del suelo se recomienda realizar la calibración del potenciómetro con soluciones reguladoras de referencia, pH 4.00, 7.00 y 10.00. Después de cada medición de pH se debe enjuagar el electrodo en agua destilada y secar para eliminar el exceso de agua.

3.7 Obtención de la materia orgánica

Para la cuantificación de la materia orgánica del suelo se siguió el proceso descrito en la norma ASTM D 2974-00 "Standard Test Methods for Moisture, Ash ,

and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils". Se trituro el suelo y se tomó una muestra que pasara la malla No. 200, se secó en el horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que tuviera un peso constante, después se tomaron 20 g de suelo seco en una charola previamente pesa y que no modifique su peso el someterla a altas temperaturas, el suelo se sometió a $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas, después se registra su peso. Se deja enfriar la muestra y después se sometió otras 3 horas a $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, se pesa la muestra y si la diferencia entre el peso anterior y el nuevo es menor a 0.1 g, con los datos obtenidos se calcula por diferencia de pesos la cantidad de materia orgánica, si no se repite el proceso.

El resultado de esta prueba se puede comparar con lo obtenido en la técnica de análisis termogravimétrico (TGA).

3.8 Obtención de la superficie específica

La determinación de la superficie específica se realizó siguiendo los pasos:

- Se preparó una solución de azul de metileno mezclando 1.0 g de polvo seco con 200 ml de agua desionizada;
- Se preparó una suspensión de suelo mezclando 10 g de suelo seco al horno con 30 ml de agua desionizada;
- Se agregó la solución de azul de metileno a la suspensión del suelo en incrementos de 0.5 ml;
- Para cada adición de solución de AM, la suspensión del suelo fue mezclada durante 1 minuto y se retiró una pequeña gota de la suspensión que fue colocada en papel de filtro P5 de la marca Fisher;
- Si el azul de metileno no absorbido forma un halo azul claro permanente alrededor del punto de agregado del suelo, se ha alcanzado el "punto final". Una vez que se alcanzó el punto final;
- Se determinó la superficie específica a partir de la cantidad de AM requerida para alcanzar el punto final.

La relación entre superficie específica y AM se observa en la ecuación (3-6).

$$S_s = \frac{1}{319.87} \frac{1}{200} (0.5N) A_v A_{AM} \frac{1}{10} \quad (3-6)$$

Donde N es el número de incrementos de AM agregados a la solución de suspensión del suelo, A_v es el número de Avogadro ($6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$), y A_{AM} es el área cubierta por una molécula de AM (generalmente se supone que es 130 \AA^2).

3.9 Curva de compresibilidad y curvas de consolidación

Para determinar la magnitud de los asentamientos y como la gasolina afecta en éstos, se obtuvieron la curva de compresibilidad y las curvas de consolidación del suelo natural y contaminado de acuerdo al procedimiento estándar descrito en la norma ASTM D 2435-03 "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading" usando el Método de prueba B que indica que el incremento de carga será cuando se alcance el 100% de consolidación primaria, sin embargo, para el propósito de esta investigación la carga se cambiará hasta que se defina la tendencia de la consolidación secundaria. Las pruebas fueron realizadas en especímenes remoldeados en los anillos de consolidación buscando representar las condiciones naturales del suelo.

3.9.1 Consolidación unidimensional en suelo natural

Se midió el volumen del anillo de consolidación, con éste y el dato de la masa volumétrica del suelo se calculó la cantidad de suelo a compactar en el anillo de consolidación con la humedad natural con la fórmula (3-7), para asemejar las propiedades naturales del suelo.

$$W_{nat} = V * \gamma_m \quad (3-7)$$

Donde:

W_{nat} = Masa de suelo a compactar en el anillo de consolidación con un contenido de humedad igual al natural, g,

V = Volumen del anillo de consolidación, cm^3 ,

γ_m = Masa volumétrica del suelo en su estado natural, g/cm^3 .

Se tomó una muestra del suelo que fue secado al aire libre, disgregado y cuarteado para obtener su porcentaje de humedad, la que se consideró como humedad inicial, con esta humedad se calculó con la ecuación (3-8) la cantidad de agua a agregar al suelo necesario para compactar en el anillo de consolidación.

$$W_{\omega_{nat}} = \left[\left(\frac{W}{1 + \omega_0/100} \right) \left(\frac{\omega_{nat}}{100} + 1 \right) \right] - W \quad (3-8)$$

Donde:

$W_{\omega_{nat}}$ = Masa de agua a agregar para alcanzar la humedad natural al suelo con una humedad inicial, g,

W = Masa del suelo con una humedad inicial, g,

ω_0 = Humedad inicial del suelo, %.

ω_{nat} = Humedad natural o buscada del suelo, %.

Se tomó una muestra de suelo suficiente para compactar en los anillos de consolidación y se le agregó el agua necesaria para alcanzar la humedad natural, se dejó reposar un día para que se equilibrara la humedad en el suelo, después se procedió a hacer la compactación del suelo calculado W_{nat} en el anillo de consolidación, se pesó el anillo más el suelo compactado para obtener las relaciones volumétricas y gravimétricas de la muestra. Se colocan las extensiones del anillo, un papel filtro en cada cara del anillo, las piedras porosas superior e inferior, previamente saturadas, y la placa superior que distribuye la carga, todo este

conjunto se pone en la cazuela de consolidación y se monta en el consolidómetro, tapando con papel adherible la cazuela para evitar la evaporación del agua. Se nivela el brazo de palanca del consolidómetro y el marco de carga. El micrómetro se coloca en ceros y se prepara un cronómetro para el control del tiempo.

Después se aplica la carga de sitio, obtenida de multiplicar la masa volumétrica del suelo y la profundidad del muestreo, se espera a que se estabilice la muestra registrando el cambio observado en el micrómetro, después se procede a realizar la saturación y de la misma forma se espera a que se estabilice, registrando las lecturas del micrómetro, se toman lecturas del micrómetro a los 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30 min y 1, 2, 4, 8 horas, después cada 24 horas.

Cuando el suelo ya está estable con la carga de sitio y la saturación, se comienzan a aplicar los incrementos de carga, las cargas a aplicar serán de aproximadamente 50, 100, 200 kPa, de acuerdo a la norma, para el cálculo de la masa a cargar en el brazo de palanca lo kPa se convierten a kg/cm^2 se multiplica por el área del anillo y después se divide entre el brazo de palanca, las cargas a aplicar son acumuladas. En cada incremento de carga se reinicia el cronómetro y se toman las lecturas en los tiempos ya definidos, el siguiente incremento se aplica cuando en la curva de consolidación se alcance a visualizar la consolidación secundaria. De la misma forma se realizan las descargas.

Con los datos de las cargas y las curvas de consolidación para cada carga se construye la gráfica de compresibilidad, con esto se calculan los asentamientos por consolidación con las fórmulas ya expresadas en los apartados 2.8 y 2.9.

3.9.2 Consolidación unidimensional suelo contaminado

Para el suelo contaminado con el volumen del anillo se calculó, de la misma forma que para el suelo natural, la masa a compactar del suelo contaminado para asemejar las condiciones naturales usando la fórmula (3-7).

Conociendo la masa del suelo contaminado a compactar se calculó la masa de sólidos con la humedad natural, la masa de la gasolina usando el porcentaje retenido ya calculado y la masa de agua a agregar al suelo contaminado para alcanzar un contenido de humedad igual al natural con las ecuaciones (3-9), (3-10) y (3-11), en este caso, el fluido de poro no será solo agua, será agua y gasolina y juntos sumaran la humedad natural, se le conocerá como contenido de fluido.

$$W_s = \frac{W_{cont}}{1 + \omega_{nat}/100} \quad (3-9)$$

$$W_g = \left(\frac{\omega_{HTP}}{100} + 1 \right) * W_s \quad (3-10)$$

$$W_\omega = W_{cont} - W_s - W_g \quad (3-11)$$

Donde:

W_s = Masa del sólido en la muestra, g,

W_{cont} = Masa de suelo a compactar en el anillo con porcentaje de fluido igual a la humedad natural, g,

ω_{nat} = Humedad natural del suelo, %,

W_g = Masa correspondiente al porcentaje de gasolina retenido en el suelo, g,

ω_{HTP} = Retenido de gasolina en el suelo, %,

W_ω = Masa del agua a agregar al suelo contaminado para llegar a un contenido de fluido igual a la humedad natural, g,

Teniendo los pesos del sólido, el agua y la gasolina de la muestra y usando la configuración para suelos contaminados propuesta por Amaziah (2010) mostrada en la Figura 2-4 en el apartado 2.11 y el volumen del anillo, se procedió a calcular los volúmenes correspondientes a las fases del suelo para obtener las propiedades volumétricas y gravimétricas encontradas en el suelo en su estado natural.

Se obtuvo el peso volumétrico de la gasolina usada, pesando la gasolina en un volumen conocido usando una probeta, con esto se calculó el volumen de gasolina. El volumen de agua se obtuvo usando el peso volumétrico del agua $\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$. El volumen del suelo se obtuvo dividiendo su peso entre la gravedad específica. Finalmente usando la relación de vacíos de la muestra natural se obtuvo el volumen del aire del suelo contaminado con un porcentaje de fluidos igual a la humedad natural con la ecuación (3-12).

$$V_{gas} = (e * V_s) - V_w - V_g \quad (3-12)$$

Donde:

V_{gas} = Volumen del aire en el suelo contaminado compactado en el anillo de consolidación, cm^3 ,

e = Relación de vacíos encontrada en el suelo en su estado natural, adimensional,

V_s = Volumen del sólido, obtenido de la relación entre el peso del sólido (W_s) y la gravedad específica (G_s), cm^3 ,

V_w = Volumen del agua obtenida de la relación entre la masa del agua (W_w) y su peso volumétrico, cm^3 ,

V_g = Volumen de la gasolina obtenida de la relación entre la masa de la gasolina (W_g) y su peso volumétrico, cm^3 ,

Con los pesos y volúmenes de la muestra se obtienen las relaciones volumétricas y gravimétricas de los especímenes de consolidación del suelo contaminado. Se toma una muestra de suelo contaminado, suficiente para compactar en los anillos de consolidación, se le agrega el agua calculada para obtener un contenido de fluido igual a la humedad natural, se deja reposar un día, se compacta en los anillos de consolidación y se sigue el proceso descrito en el apartado 3.9.1 Consolidación unidimensional en suelo natural. Se aplicaron las mismas cargas que en el suelo natural y la misma carga de sitio.

Con los datos de las cargas y las curvas de consolidación para cada carga se construyeron las gráficas de compresibilidad, con esto se calculan los asentamientos por consolidación con las fórmulas ya expresadas en los apartados 2.8 y 2.9 y teniendo estos datos se compararon con lo encontrado en el suelo natural.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Propiedades geotécnicas del suelo natural

En el capítulo 3. METODOLOGÍA se explica ampliamente los procesos para la obtención de las propiedades geotécnicas del suelo. Con estos datos se obtuvieron las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo en su estado natural, en el apartado APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO NATURAL se presentan los datos y los cálculos realizados, en la Tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos que servirán para el remoldeo de las muestras para consolidación del suelo natural y contaminado.

Tabla 4.1 Relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo natural.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Humedad natural</i>	ω	32.88	%
<i>Masa volumétrica de la muestra</i>	Υ_m	17.17	kN/m ³
<i>Masa volumétrica sólida</i>	Υ_d	12.95	kN/m ³
<i>Gravedad específica</i>	G_s	2.599	Adimensional
<i>Relación de vacíos</i>	e	0.97	Adimensional
<i>Porosidad</i>	n	49.29	%
<i>Grado de saturación</i>	G_w	87.95	%

En la Tabla 4.2 se muestran los valores de las propiedades geotécnicas obtenidas del suelo, así como otras propiedades: la actividad de las arcillas, el pH, la materia orgánica y la superficie específica. Todas las propiedades se obtuvieron de las muestras de suelo alteradas con los procesos descritos en el apartado 3. METODOLOGÍA para la obtención de las propiedades, en el APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO NATURAL se muestran las tablas de cálculo para los valores obtenidos.

Tabla 4.2 Propiedades geotécnicas suelo natural.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Humedad natural</i>	ω	32.88	%
<i>Masa volumétrica de la muestra</i>	γ_m	17.17	kN/m ³
<i>Gravedad específica</i>	G_s	2.599	Adimensional
<i>Límite líquido</i>	LL	81.33	%
<i>Límite plástico</i>	LP	34.22	%
<i>Índice de plasticidad</i>	I_p	47.12	%
<i>Contracción lineal</i>	CL	20.91	%
<i>Límite de contracción</i>	LC	13.12	%
<i>Gravas</i>	G	0.48	%
<i>Arena</i>	S	1.44	%
<i>Limo</i>	M	35.24	%
<i>Arcilla</i>	C	62.84	%
<i>Clasificación SUCS</i>	---	CH	---
<i>Superficie específica</i>	Se	691.51	m ² /g
<i>Actividad</i>	A	0.75	Adimensional
<i>Potencial de hidrógeno</i>	pH	7.94	Adimensional
<i>Materia orgánica</i>	MO	5.96	%

De la Tabla 4.1 se tiene la porosidad la muestra se considera medianamente densa o firme de acuerdo a Budhu (2011) y Das (2001), considerando las relaciones volumétricas y gravimétricas de acuerdo a Das (2001) el suelo se considera una arcilla suave, tomando en cuenta las relaciones volumétricas y gravimétricas se tiene que el grado de saturación de 87.97%, por lo que solo el 12.03% de los poros del suelo tiene aire, considerando la gravedad específica según Das (2001) el valor obtenido corresponde a los típicos de un mineral de Caolinita y Clorita, de la misma forma Das (2012) enuncia que la gravedad específica encontrada es típica de un

suelo Marga, sedimento formado principalmente por arcilla y calcita, de acuerdo a Budhu (2011) la masa volumétrica sólida corresponde a una arcilla.

En la Tabla 4.2 se muestran los valores de límites de consistencia obtenidos, de acuerdo a Budhu (2011) y Mitchell et al. (2005) los valores de los límites son los típicos encontrados en arcillas de tipo Caolinita e Ilita, considerando los límites de consistencia y el porcentaje correspondiente a cada tamaño de partícula usando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se tiene que el suelo con el que se está trabajando se trata de una arcilla de alta compresibilidad (CH). De acuerdo a la actividad de la arcilla Das (2001) y Mitchell et al. (2005) expresan que se trata del mineral de arcilla Ilita, Budhu (2011) lo clasifica con una actividad normal correspondiente a una Ilita o una Montmorillonita, lo que coincide con Das (2014), de acuerdo a la superficie específica la que se encuentra entre los rangos de la Ilita y la Montmorillonita. Considerando el pH el suelo se encuentra dentro del rango neutral con una ligera alcalinidad.

4.2 Propiedades del suelo contaminado

4.2.1 Contenido de gasolina del suelo contaminado

Como se explicó en el apartado 3. METODOLOGÍA se aproximó el contenido de gasolina del suelo mediante tres métodos. El contenido de gasolina que se obtuvo sometiendo al suelo a 110°C y luego a 210°C en la Tabla 4.3 se muestra los porcentajes obtenidos.

Tabla 4.3 Porcentaje de gasolina.

<i>Temperatura</i>	<i>% de pérdida de peso (contenido de gasolina %)</i>
110°C	4.65
210°C	6.17

Otro método que se usó para la aproximación de la cantidad de gasolina contenida en el suelo fue usando la gravedad específica del suelo natural y del suelo contaminado. La gravedad específica del suelo contaminado se obtuvo de dos formas, secando el suelo contaminado al horno a 110°C antes de la prueba como lo enuncia la ASTM C 128- 12 (2012), y tomando una muestra de suelo y al final de la prueba restándole el peso correspondiente a la gasolina, de las dos formas el valor de la gravedad específica obtenido fue el mismo 2.534, pero debido a que el valor de la gravedad específica de un suelo solo puede modificarse si se afecta el mineral del que está compuesto el suelo y basado en los estudios revisados, el someter al suelo a contaminación no produce una modificación en su mineralogía; se considera que la modificación en la gravedad específica es debido a que las partículas de suelo aún tienen gasolina, y la gravedad específica no es la del suelo, si no la del suelo y la gasolina.

Considerando lo anterior se propuso lo siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{W_{ss} + W_g}{(V_{ss} + V_g)\gamma_0} \quad (4-1)$$

Donde:

G_s = corresponde al valor de la gravedad específica del suelo contaminado.

V_{ss} = es volumen de sólidos que es igual a $V_{ss} = \frac{W_{ss}}{G_s \gamma_0}$, que es el peso del suelo sobre la gravedad específica del suelo natural y el peso volumétrico del agua que es igual a 1 g/cm³.

V_g = es el volumen de la gasolina que es igual a $V_g = \frac{W_g}{\gamma_g}$, que es el peso de la gasolina sobre el peso volumétrico de la gasolina que es igual a 0.78 gr/cm³.

γ_0 = peso volumétrico del agua 1 g/cm³.

Por lo que la ecuación queda:

$$2.534 = \frac{W_{ss} + W_g}{\left(\frac{W_{ss}}{2.599 \cdot 1 \text{ gr/cm}^3} + \frac{W_g}{0.78 \text{ gr/cm}^3} \right) 1 \text{ gr/cm}^3} \quad (4-2)$$

Realizando el despeje de la fórmula se tiene que la cantidad de gasolina que queda en el suelo después del proceso de la gravedad específica corresponde al 1.12% de masa del suelo seco y limpio. La diferencia del suelo seco a 110°C y luego a 210°C es 1.48%. Por lo anterior la cantidad de gasolina contenida en el suelo a los 9 meses de exposición se tomó como el 6% del peso de suelo seco, este porcentaje se usó para el remoldeo de las muestras para la consolidación del suelo contaminado.

4.2.1.1 Análisis termogravimétrico del suelo contaminado (TGA)

El suelo expuesto a la gasolina durante 9 meses se disgregó y tamizó por la malla No. 200, a una muestra de 17.56 mg se le realizó el TGA con el equipo de TGA Q500 fabricado por TA instruments, la prueba se llevó a cabo en una atmosfera de nitrógeno y con una velocidad de calentamiento de 10 °C/minuto.

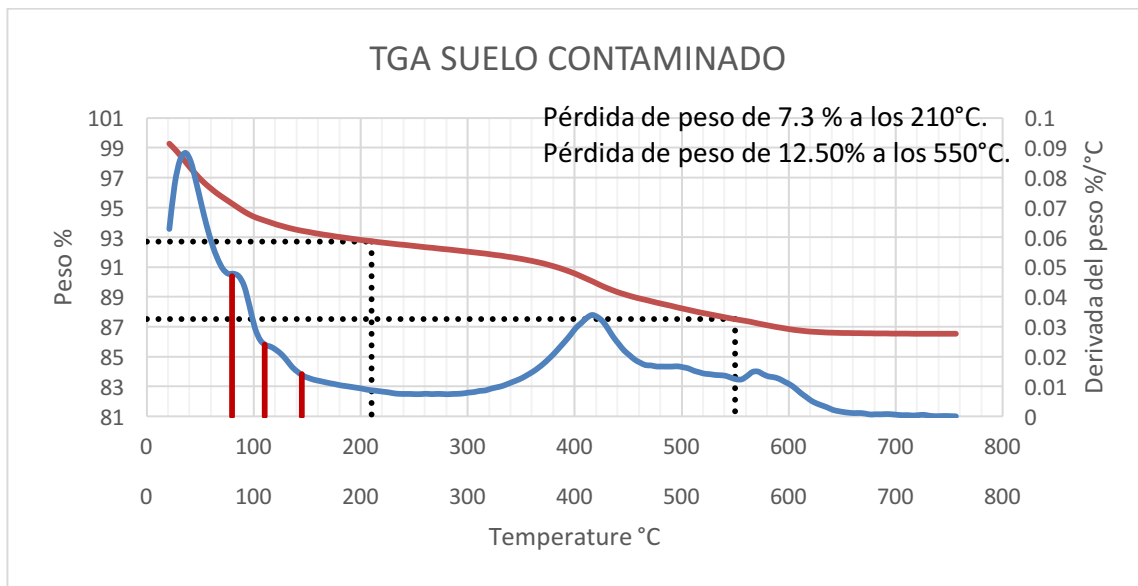


Figura 4-1 Curva de análisis termogravimétrico del suelo contaminado.

En la Figura 4-1 se observa la curva de la pérdida de peso con el aumento de la temperatura y la de la derivada del peso, en esta grafica se puede notar que a los 210°C el suelo tiene una pérdida de peso correspondiente al 7.30%, cabe señalar que el análisis termogravimétrico se trata de un estudio muy preciso y se realiza en una muestra muy pequeña de suelo, por lo que es posible que durante el proceso de la prueba el suelo pierda peso por la volatilización de la gasolina y gane peso de la humedad del ambiente, también se observa que a los 550°C se tiene una pérdida de peso de 12.50%, este peso es el que se considera como materia orgánica, debido a que el suelo antes de contaminarse se sometió al proceso de secado.

Otra cosa que se observa es que en la curva de la derivada del peso %/°C, antes de los 210°C, que es la temperatura a la que se volatiliza la gasolina en su totalidad, se tiene tres picos de pérdida de peso, que se encuentran marcados en la gráfica, a los 80°C, 110°C y 145°C, pero se observa que el pico presente a los 80°C es más pronunciado, por lo que se concluye que la mayoría de la gasolina se pierde a esta temperatura. En el 7. APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO CONTAMINADO se muestra las tablas y graficas obtenidas en el análisis.

4.2.2 Propiedades geotécnicas del suelo contaminado

Después del periodo de reposo del suelo se obtuvieron las propiedades geotécnicas con los procesos ya descritos en el apartado 3. METODOLOGÍA, en la Tabla 4.4 se muestran los valores de las propiedades geotécnicas obtenidas, así como otras propiedades como la actividad de las arcillas, el pH, la materia orgánica y la superficie específica. En el APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO CONTAMINADO se encuentran las tablas con los cálculos para la obtención de las propiedades enlistadas.

Tabla 4.4 Propiedades geotécnicas del suelo contaminado.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Gravedad específica</i>	G_s	2.534	Adimensional
<i>Límite líquido</i>	LL	84.46	%
<i>Límite plástico</i>	LP	38.18	%
<i>Índice de plasticidad</i>	I_p	46.37	%
<i>Contracción lineal</i>	CL	21.24	%
<i>Límite de contracción</i>	LC	13.38	%
<i>Gravas</i>	G	0.03	%
<i>Arena</i>	S	1.74	%
<i>Limo</i>	M	37.36	%
<i>Arcilla</i>	C	60.87	%
<i>Clasificación SUCS</i>	---	CH	---
<i>Superficie específica</i>	Se	514.06	m ² /g
<i>Actividad</i>	A	0.78	Adimensional
<i>Potencial de hidrógeno</i>	pH	7.66	Adimensional
<i>Materia orgánica</i>	MO	12.50	%

De acuerdo a Mitchell et al. (2005) y a Das (2001) el valor de la gravedad específica obtenido del suelo contaminado es típico de los minerales Caolinita y Clorita. Analizando los valores de los límites de consistencia correspondientes al suelo contaminado mostrados en la Tabla 4.4 de acuerdo a Budhu (2011) y Mitchell et al. (2005) los valores de los límites son los típicos encontrados en arcillas de tipo Caolinita e Illita, considerando los límites de consistencia y el porcentaje correspondiente a cada tamaño de partícula usando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se tiene que el suelo contaminado se clasifica como arcilla de alta compresibilidad (CH). De acuerdo a la actividad de la arcilla Das (2001) y Mitchell et al. (2005) declaran que se trata del mineral de arcilla Illita, Budhu (2011) lo clasifica con una actividad normal correspondiente a una Illita o una

Montmorillonita, de la misma forma la superficie específica se encuentra en los rangos de la Illita y la Montmorillonita, de acuerdo a su pH el suelo se encuentra dentro del rango neutral con una ligera alcalinidad.

Es importante señalar que los límites de consistencia obtenidos se hicieron agregando agua destilada al suelo contaminado, por lo que el valor reportado es el contenido de fluido en el suelo, que es agua más gasolina, además de que se llevó un control del agua que se agregaba al suelo para obtener los límites, esto con el objetivo de calcular la diferencia entre la humedad teórica, que corresponde a la humedad considerando al suelo totalmente seco y la humedad real, que es la que se reporta en la Tabla 4.4, en el 8. APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO CONTAMINADO se muestra un ejemplo de tabla de control de humedades para los límites del suelo contaminado. La diferencia entre la humedad calculada y la teórica es aproximadamente 3.05%.

4.3 Comparativa de propiedades de suelo natural y suelo contaminado.

En la Tabla 4.5 se muestran las propiedades del suelo natural y del suelo contaminado, en el caso de los límites de consistencia se muestra el porcentaje de fluido y el porcentaje de agua.

Como se puede observar en la Tabla 4.5 la gravedad específica del suelo disminuye, quizás la disminución observada no es mucha numéricamente, sin embargo considerando las propiedades gravimétricas y volumétricas si afecta, pero como ya se había mencionado anteriormente para que exista una modificación en la gravedad específica del suelo tendría que modificarse la mineralogía del mismo, por lo que la modificación presente en la gravedad específica se desprecia, y se considera que esta modificación es debido a que aun después de la prueba de gravedad específica, queda un poco de gasolina en las partículas del suelo y debido a que el peso volumétrico de la gasolina es menor, causa una disminución en la gravedad específica del suelo.

Tabla 4.5 Propiedades de suelo natural y suelo contaminado.

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Suelo natural</i>	<i>Suelo contaminado 6% de gasolina (9 meses)</i>	<i>Unidad</i>
<i>Gravedad específica</i>	G _s	2.599	2.534	Adimensional
<i>Límite líquido</i>	LL	81.33	84.46-81.41	%
<i>Límite plástico</i>	LP	34.22	38.18-35.13	%
<i>Índice de plasticidad</i>	I _p	47.12	46.37-46.28	%
<i>Contracción lineal</i>	CL	20.91	21.24-18.19	%
<i>Límite de contracción</i>	LC	13.12	13.38-10.33	%
<i>Gravas</i>	G	0.48	0.03	%
<i>Arena</i>	S	1.44	1.74	%
<i>Limo</i>	M	35.24	37.36	%
<i>Arcilla</i>	C	62.84	60.87	%
<i>Clasificación SUCS</i>	---	CH	CH	---
<i>Superficie específica</i>	Se	691.51	514.06	m ² /g
<i>Actividad</i>	A	0.75	0.78	Adimensional
<i>Potencial de hidrógeno</i>	pH	7.94	7.66	Adimensional
<i>Materia orgánica</i>	MO	5.96	12.50	%

Como se puede observar en la Tabla 4.5 la gravedad específica del suelo disminuye, quizás la disminución observada no es mucha numéricamente, sin embargo considerando las propiedades gravimétricas y volumétricas si afecta, pero como ya se había mencionado anteriormente para que exista una modificación en la gravedad específica del suelo tendría que modificarse la mineralogía del mismo,

por lo que la modificación presente en la gravedad específica se desprecia, y se considera que esta modificación es debido a que aun después de la prueba de gravedad específica, queda un poco de gasolina en las partículas del suelo y debido a que el peso volumétrico de la gasolina es menor, causa una disminución en la gravedad específica del suelo.

Los límites de consistencia, se observa que tienen un comportamiento semejante, considerando el agua más la gasolina existe una mayor diferencia, pero esta diferencia no es tan grande para considerar que se tratan de suelos diferentes, la diferencia presentada podría presentarse en la repetición de la prueba. Debido a esto la clasificación del suelo es la misma, el suelo contaminado y natural se clasifican como una arcilla de alta compresibilidad (CH), sin embargo el suelo contaminado se acerca más a la línea de A de la carta de plasticidad, por lo cual el suelo contaminado es menos compresible que el suelo natural.

La granulometría de los suelos natural; 0.48% gravas, 1.44% arenas, 35.24% limos y 62.84% arcillas; y contaminado; 0.03% gravas, 1.74% arenas, 37.36% limos y 60.87% arcillas; no presenta variación significativa se considera el mismo suelo, sin embargo la variación entre el porcentaje de arcillas y el índice plástico de los suelos, hace que la actividad presentada por el suelo contaminado sea de 0.78 mientras que la del suelo natural es de 0.75, pero ésta aún se sigue considerando como actividad normal.

En el potencial de hidrogeno se observa que el suelo tiende a acidificarse, disminuye su pH de 7.94 en el suelo natural a 7.66 en el suelo contaminado con gasolina, estos resultados coinciden con lo encontrado con otros autores. El incremento de la materia orgánica de 5.96% en el suelo natural a 12.50% en el suelo contaminado corresponde al porcentaje de gasolina contenido en el suelo.

Es importante poner atención a la variación presente en la superficie específica, ya que la superficie específica del suelo disminuye de 691.51 m²/g en el

suelo natural a 514.06 m²/g en presencia de la gasolina, de la misma forma se podría considerar que, debido a que las partículas de suelo tienen un recubrimiento de gasolina, al momento de realizar la determinación con azul de metileno, éste no alcanza a cubrir toda la superficie de la partícula debido a que parte de ésta se encuentra envuelta por el hidrocarburo, por esta razón disminuye la superficie específica, estos resultados coinciden con lo encontrado en trabajos revisados. Oztoprak y Pisirici (2011) estudiando arcillas expuestas a lixiviados en vertederos encontraron una disminución en la superficie específica, concluyendo que esta disminución se debía a la formación de una biopelícula que rodeaba completamente las partículas y creaba partículas más grandes equivalentes.

4.4 Prueba de consolidación

La prueba de consolidación se hizo en muestras remoldeadas tanto en el suelo natural, como en el suelo contaminado, el suelo natural se remoldeo tomando en cuenta el volumen del anillo y las condiciones de sitio del suelo, mostradas en la Tabla 4.1. Para el suelo contaminado se tomó como base la configuración del suelo contaminado propuesta por Amaziah (2010) mostrada en la Figura 2-4 se calculan la cantidad de suelo contaminado con gasolina necesario para representar las condiciones naturales del suelo considerando para los cálculos un 6.00% de gasolina que pertenece a la parte líquida de la muestra en el suelo contaminado expuesto a 9 meses y un 12.00% de gasolina del suelo contaminado expuesto a 7 días, el cual se calculó por diferencia de pesos. La cantidad de suelo calculada considerando una humedad inicial de 6% y 12%, contenido de gasolina remanente, se le agregó 26.88% y 20.88% respectivamente para alcanzar la humedad inicial, se homogenizó el suelo dentro de una bolsa y se dejó reposar un día, al día siguiente se compactó la muestra dentro del anillo, procurando que no se perdiera nada de la muestra para acercarse lo más posible a la relación de vacíos inicial.

Se realizó el remoldeo del suelo en los anillos, considerando, tanto para el suelo natural como para el suelo contaminado una gravedad específica de 2.599. Durante el cálculo de las relaciones volumétricas y gravimétricas del suelo contaminado se observaron algunas incongruencias, en la Figura 4-2 se observan los cálculos de una muestra contaminada remoldeada.

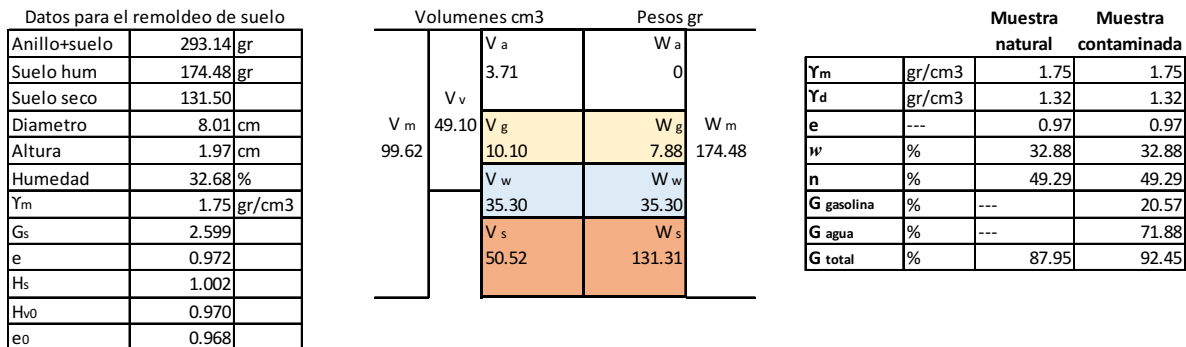


Figura 4-2 Cálculos para el remoldeo.

Se consideró que el suelo de la muestra total tiene un 6% de gasolina y un 26.88% de agua destilada, con lo que suman el 32.88% de humedad natural, y se remoldeo a la relación de vacíos inicial y a la porosidad inicial, sin embargo, cuando se obtiene el grado de saturación en el caso del suelo contaminado es mayor, esto es debido a que el peso volumétrico de la gasolina es más pequeño que el del agua, se necesita un mayor volumen de gasolina para tener el mismo peso correspondiente al agua, por lo que los poros del suelo se encuentran más satisfechos, por lo que las muestras compactadas contaminadas tendrán menor volumen de aire.

4.5 Curvas de consolidación y curva de compresibilidad

Se realizó el remoldeo de las muestras y se comenzó con el ensaye de consolidación, se agregó la carga de sitio, que correspondía a 47 kPa, se saturó la muestra y se agregó la primera carga de 50 kPa.

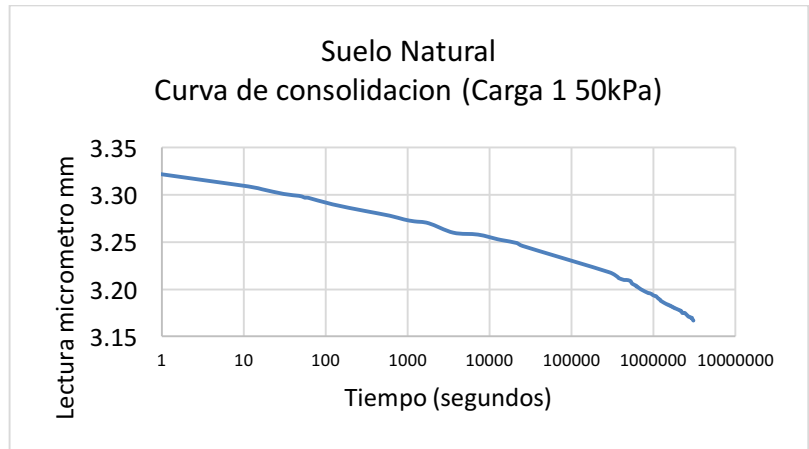


Figura 4-3 Curva de consolidación del suelo natural con la carga de sitio más 50 kPa.

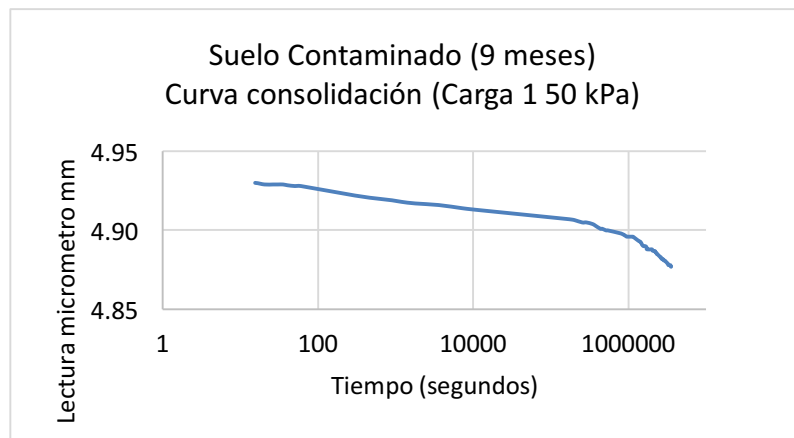


Figura 4-4 Curva de consolidación del suelo contaminado con la carga de sitio más 50 kPa.

En las Figura 4-3 y Figura 4-4, se observa la curva de consolidación de la primera carga, la primera carga se dejó 45 días, en el caso del suelo natural y 35 días en el caso del suelo contaminado, pero como es apreciable en las figuras, la consolidación secundaria no se aprecia aun después del tiempo de carga.

Debido a que la consolidación secundaria aún no se apreciaba, se decidió calcular el porcentaje de deformación que tenía la muestra y se calcularon las velocidades de deformación causadas por la carga de 50 kPa, usando las curvas

de consolidación en escala aritmética que se muestran en las Figuras Figura 4-5Figura 4-6.

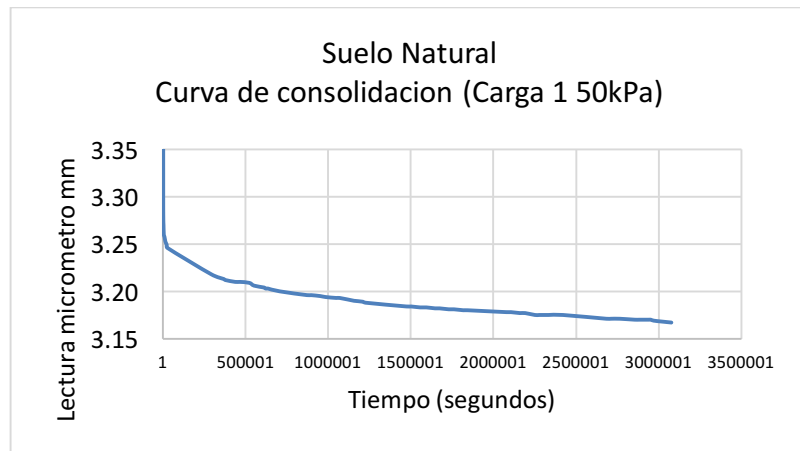


Figura 4-5 Curva de consolidación suelo natural, carga de 50 kPa, escala aritmética.

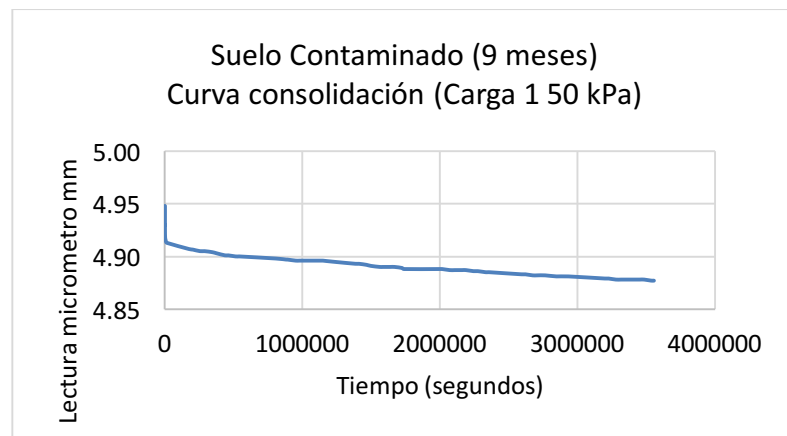


Figura 4-6 Curva de consolidación suelo natural, carga de 50 kPa, escala aritmética.

En las curvas de consolidación en escala aritmética, es fácilmente apreciable como pareciera que el suelo se seguirá deformando infinitamente, se calcularon las deformaciones, en la Tabla 4.6 se muestran las deformaciones obtenidas en la primera carga, debido a que el porcentaje de deformación menor al 0.03% se decidió cambiar la carga, y se definió que las siguientes cargas se dejarían hasta 15 días, después se cambiarían. Debido a que no fue posible apreciar la

consolidación secundaria, se optó por analizar las deformaciones con las velocidades de deformación obtenidas en las curvas de consolidación en escala aritmética.

Después se agregaron las siguientes cargas de 100 kPa, 200 kPa. En la Figura 4-7 se muestran las curvas de compresibilidad del suelo natural, contaminado expuesto 9 meses y contaminado expuesto siete días.

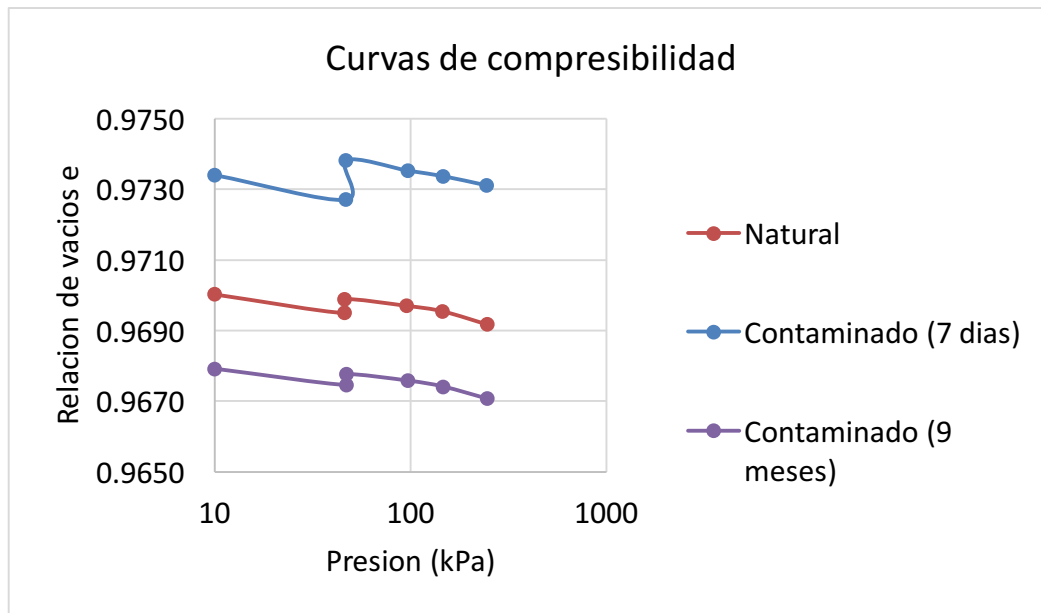


Figura 4-7 Curvas de compresibilidad.

En las gráficas mostradas se puede observar los puntos de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa, con la carga de sitio, el suelo tiene hasta una carga de 250 kPa, aproximadamente. En la Figura 4-7 se puede observar que las curvas se comportan de manera diferente, esto es fácil de apreciar debido a la escala del gráfico.

El suelo natural y contaminado a 9 meses, visualmente se observa que tuvieron una menor expansión que el suelo contaminado a 7 días. La primera carga del suelo se dejó 4 semanas, y aun a las 4 semanas no se alcanzó a apreciar la consolidación secundaria se calculó el porcentaje de deformación que tenía el suelo

hasta este tiempo así como las deformaciones, en la Tabla 4.6 se tienen los valores calculados para cada carga.

Tabla 4.6 Relación de vacíos y deformaciones de curvas de consolidación.

SUELO NATURAL						
	Inicial	Carga sitio	Saturación	Carga 1	Carga 2	Carga 3
Presión (kPa)	0	46	46	96	146	246
Relación de vacíos	0.9700	0.9695	0.9699	0.9697	0.9695	0.9692
Altura (mm)	20.120	20.115	20.119	20.117	20.115	20.111
Deformación %	0.0000	0.0268	0.0071	0.0166	0.0245	0.0434

CONTAMINADO 7 DIAS						
	Inicial	Carga sitio	Saturación	Carga 1	Carga 2	Carga 3
Presión (kPa)	0	47	47	97	147	245
Relación de vacíos	0.9734	0.9727	0.9738	0.9735	0.9734	0.9731
Altura (mm)	20.247	20.240	20.251	20.248	20.246	20.244
Deformación %	0.0000	0.0353	-0.0210	-0.0063	0.0016	0.0147

CONTAMINADO 9 MESES						
	Inicial	Carga sitio	Saturación	Carga 1	Carga 2	Carga 3
Presión (kPa)	0	47	47	97	147	247
Relación de vacíos	0.9679	0.9675	0.9678	0.9676	0.9674	0.9671
Altura (mm)	19.723	19.719	19.722	19.720	19.718	19.715
Deformación %	0.0000	0.0234	0.0080	0.0171	0.0258	0.0431

En la Tabla 4.6 con los valores de relación de vacío y las deformaciones se observa que el suelo natural y el suelo contaminado a 9 meses tienen valores semejantes de deformaciones para las cargas, en cambio si se analiza el suelo contaminado a 7 días, se observa que presenta expansión, definido en las deformaciones negativas, la carga que satisface la presión de expansión en el suelo contaminado a 7 días es la carga 2, que corresponde a 100 kPa.

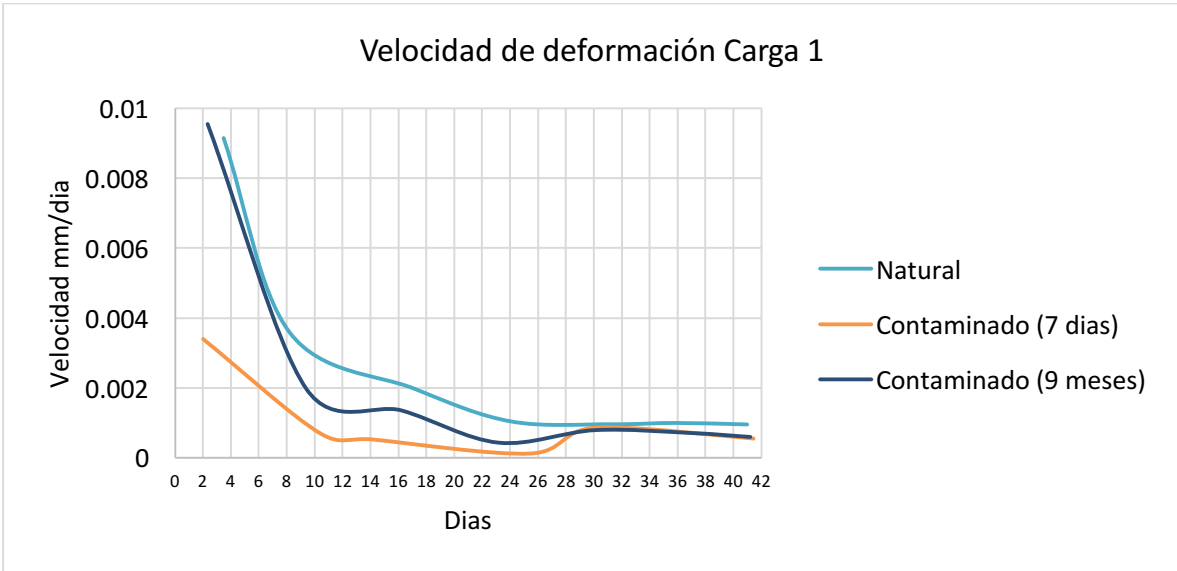


Figura 4-8 Comportamiento de las velocidades de deformación con respecto al tiempo del suelo en la Carga 1 de 50 kPa.

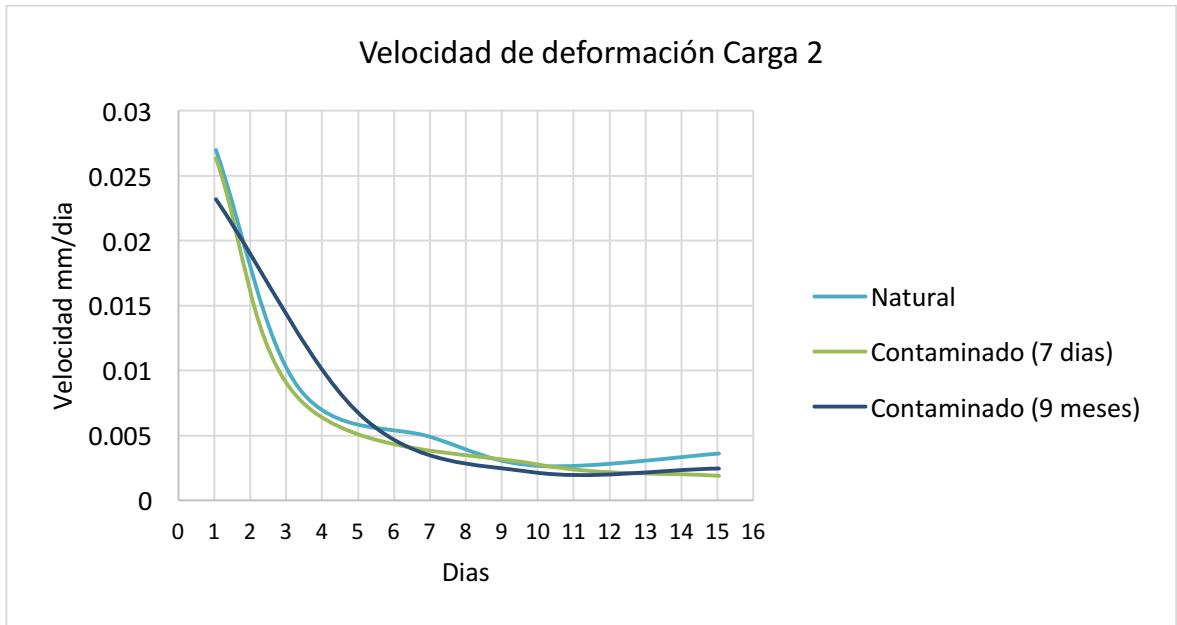


Figura 4-9 Comportamiento de las velocidades de deformación con respecto al tiempo del suelo en la Carga 2 de 100 kPa.

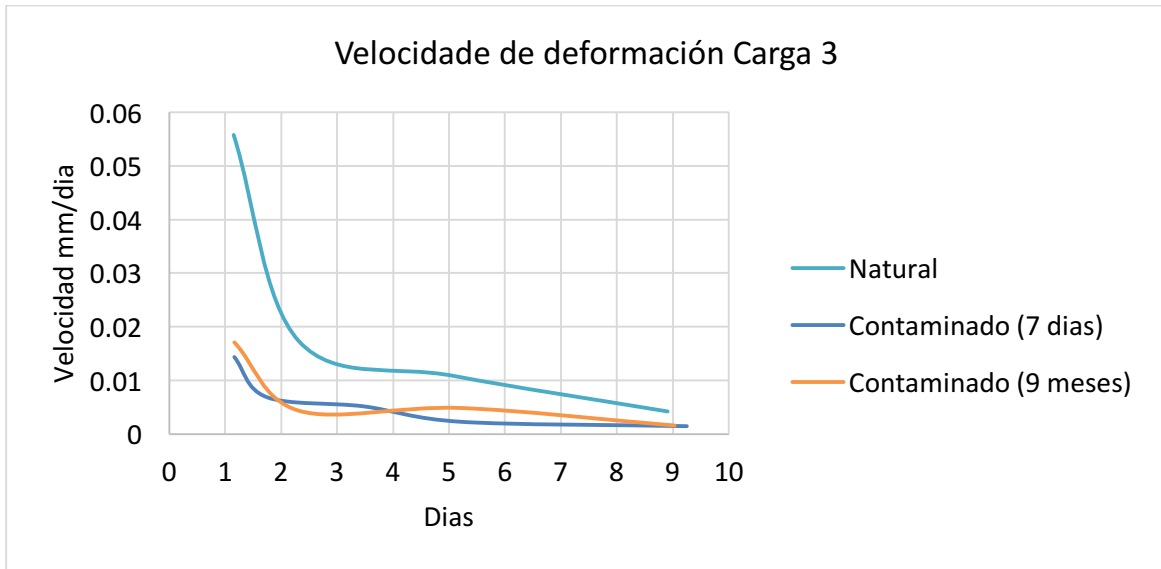


Figura 4-10 Comportamiento de las velocidades de deformación con respecto al tiempo del suelo en la Carga 1 de 200 kPa.

En la Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10 se muestran las gráficas del comportamiento de la velocidad de deformación de las consolidaciones para cada carga, en las gráficas se puede observar que en la Carga 1 la velocidad de deformación a los 41 días del suelo natural es mayor al contaminado y la del suelo contaminado se tiene una velocidad igual a los 41 días, en la Carga 2 a los 15 días el suelo natural tiene una mayor velocidad de deformación siguiéndole el suelo contaminado a los 9 meses y de ahí el suelo contaminado a los 7 días, en las velocidades de la Carga 3 de inicio se observa que la velocidad del suelo contaminado es menor en el primer día y a los 9 días el suelo natural tiene mayor velocidad de deformación comparada con el suelo contaminado. Considerando las gráficas se podría decir que el suelo se asienta más rápido que el suelo contaminado, por lo que se consolidara más rápido.

Tabla 4.7 Valores de velocidades de asentamiento para cada carga.

Carga 1 (velocidades de asentamiento)

Natural		Contaminado (7 días)		Contaminado (9 meses)	
Días	mm/día	Días	mm/día	Días	mm/día
3	0.009145	2	0.003404	2	0.009549
8	0.003582	10	0.000701	9	0.001983
17	0.001982	14	0.000524	16	0.001359
24	0.001045	25	0.000123	23	0.000437
31	0.000964	30	0.000864	30	0.000796
36	0.001002	41	0.000553	37	0.000712
41	0.000959			41	0.000600

Carga 2 (velocidades de asentamiento)

Natural		Contaminado (7 días)		Contaminado (9 meses)	
Días	mm/día	Días	mm/día	Días	mm/día
1	0.02700	1	0.026341	1	0.023180
3	0.00864	3	0.007513	5	0.006203
7	0.00486	10	0.002777	10	0.002160
10	0.00266	15	0.001878	15	0.002434
15	0.00362				

Carga 3 (velocidades de asentamiento)

Natural		Contaminado (7 días)		Contaminado (9 meses)	
Días	mm/día	Días	mm/día	Días	mm/día
1	0.05578	1	0.014400	1	0.017079
2	0.01728	2	0.006912	2	0.004320
5	0.01080	3	0.005184	5	0.004838
9	0.00419	5	0.002304	9	0.001571
		9	0.001485		

En la Tabla 4.7 se pueden observar los valores de las velocidades de asentamiento en donde es posible corroborar lo concluido de las gráficas.

Se tomó la velocidad de deformación observada a los 15 días para una aproximación de los asentamientos que podría mostrar el suelo estudiado en su estado natural y contaminado.

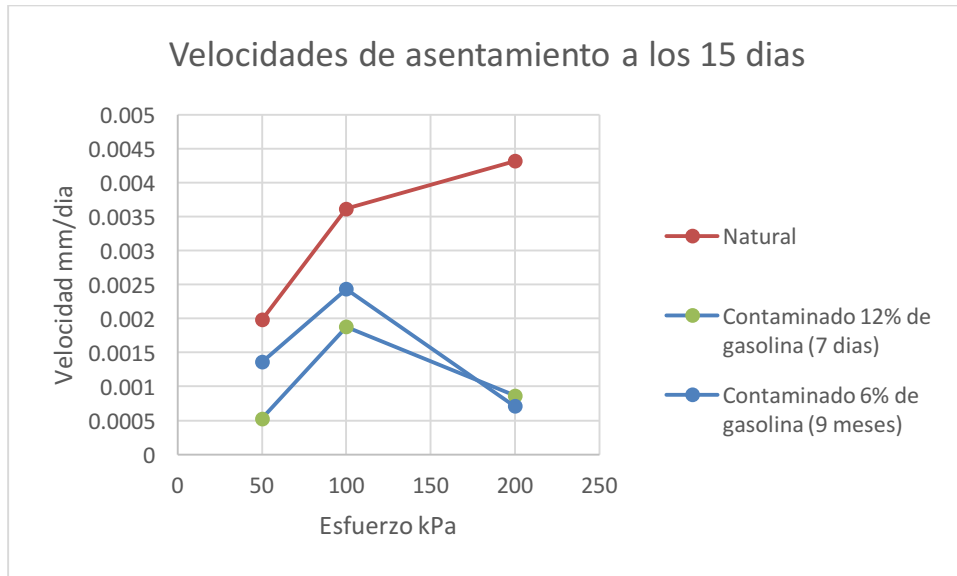


Figura 4-11 Velocidades de asentamiento a los 15 días de carga del suelo.

En la Figura 4-11 se observan las velocidades presentes en el suelo a los 15 días de explosión a las diferentes cargas, de este gráfico se puede observar que las velocidades para el suelo natural son mayores que las del suelo contaminado, y la velocidad de deformación para la última carga, de 200 kPa, para el suelo contaminado es muy baja en comparación a la del suelo natural, lo que hace concluir que el suelo contaminado estaba por consolidarse, ya que las velocidades de asentamiento ya eran muy bajas.

Las Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14 muestran los asentamientos que presenta el suelo con la velocidad calculada a los 15 días de 1 a 5 años, de las diferentes cargas agregadas al suelo en el ensaye de consolidación.

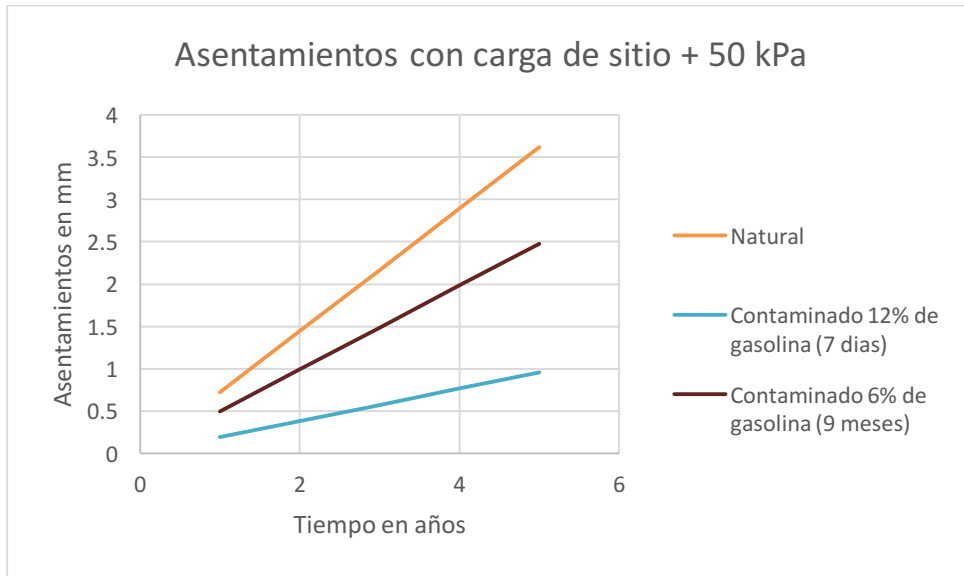


Figura 4-12 Asentamientos en milímetros que presenta el suelo natural y contaminado cuando se le agrega una carga de 50 kPa a la carga de sitio.

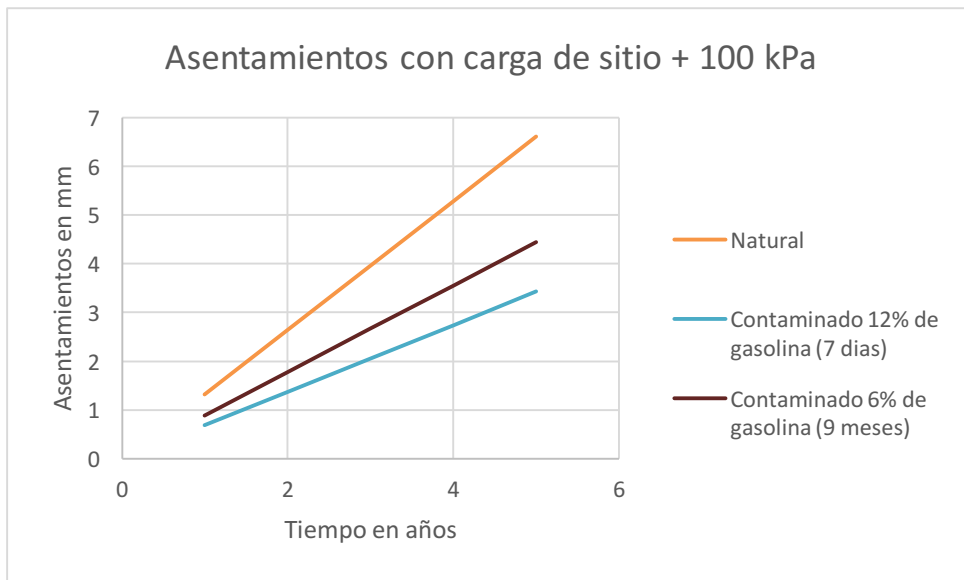


Figura 4-13 Asentamientos en milímetros que presenta el suelo natural y contaminado cuando se le agrega una carga de 100 kPa a la carga de sitio.

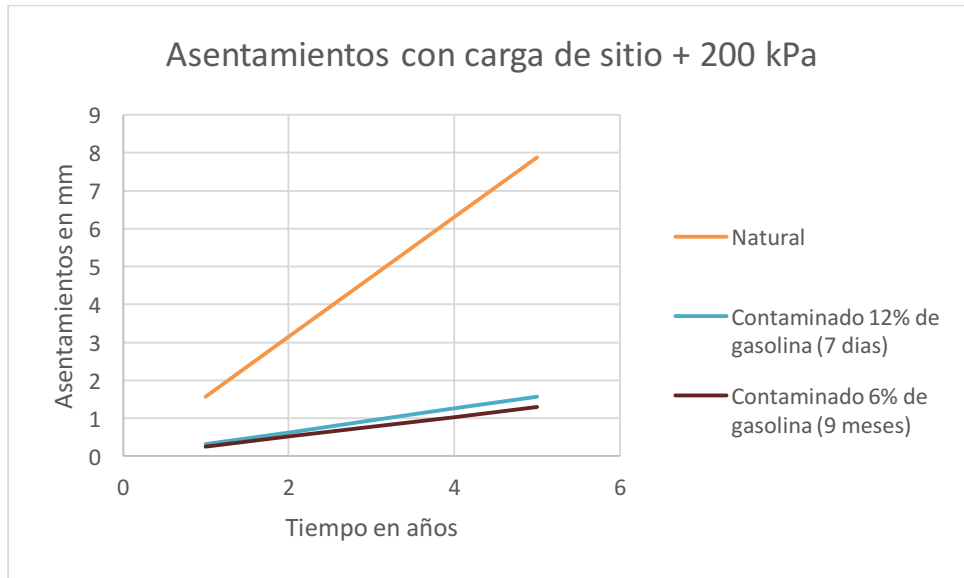


Figura 4-14 Asentamientos en milímetros que presenta el suelo natural y contaminado cuando se le agrega una carga de 200 kPa a la carga de sitio.

En las Figura 4-12, Figura 4-13 y Figura 4-14 se visualiza fácilmente que el suelo siempre presenta mayor asentamiento, el suelo expuesto a la gasolina con un contenido de gasolina del 6% presenta unos valores de asentamiento más acercados a los observados en el suelo natural, sin embargo, en cargas más grandes el suelo contaminado a 9 meses y a 7 días con 6% y 12% de contaminante adquieren un comportamiento más parecido.

Debido a que no se pudo observar la consolidación secundaria en las curvas de consolidación, se realizó una curva Proctor para observar cual es el menor valor de la relación de vacíos que puede tener el suelo, en la Figura 4-15 se observan las curvas de compactación Proctor Estándar del suelo natural y contaminado.

Las curvas de compactación del suelo contaminado se realizaron, de la misma forma que los límites, controlando el agua agregada, con estos cálculos se obtuvo que la diferencia entre el contenido de humedad teórico y el calculado era de aproximadamente 3%, con lo cual se concluyó que en el proceso de compactación el suelo retiene el 3% de gasolina. Partiendo de esto, se obtuvieron

las relaciones volumétricas y gravimétricas del óptimo de compactación obtenido del suelo natural y del suelo contaminado.

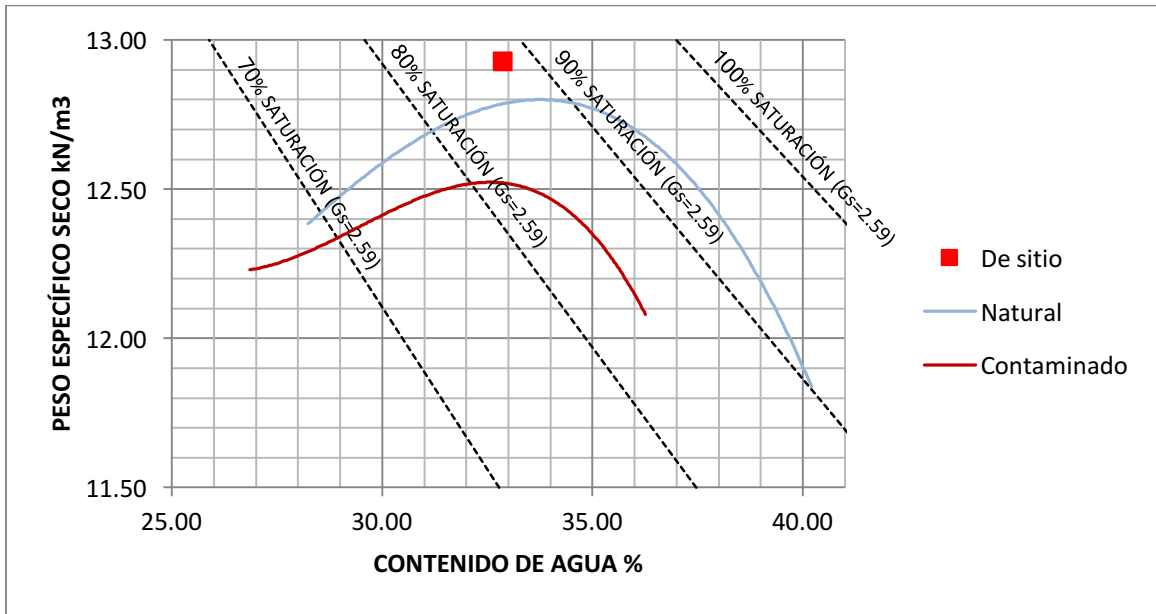


Figura 4-15 Curvas de compactación Proctor Estándar de suelo natural y contaminado.

Tabla 4.8 Relaciones volumétricas y gravimétricas de acuerdo a los óptimos de compactación Proctor Estándar.

		Del sitio	Proctor Estándar natural	Proctor Estándar contaminado
w	%	32.88	33.90	32.60
Ym	g/cm ³	1.751	1.747	1.692
Yd	g/cm ³	1.318	1.305	1.276
Gs	g/cm ³	2.599	2.599	2.599
e	---	0.972	0.992	1.037
n	%	49.285	49.797	50.914
G w	%	87.946	88.826	83.804

En la Tabla 4.8 se observan los óptimos de compactación, de acuerdo a estos datos, en la compactación Proctor Estándar del suelo natural la menor relación de

vacíos que se puede alcanzar es 0.992, mientras que la del suelo contaminado es de 1.037 y la del sitio es 0.972, con esto se puede concluir que el suelo en sitio se encuentra más compactado que lo máximo que se puede alcanzar por esta prueba.

4.6 Predicción del índice de compresión en suelos contaminados

Singh et al. (2008) estudiaron las características de consolidación de una arcilla de baja compresibilidad (CL) y una arcilla de alta compresibilidad (CH) contaminados con 3%, 6% y 9% de derivados del petróleo como gasolina, diésel, aceite de motor y keroseno, encontrando que el índice de compresión aumenta (C_c), excepto con el keroseno, y el índice de consolidación (C_v) disminuye en todos los casos, con el 3% de contaminación es donde se tiene el mayor cambio en el C_v y el C_c , esto implica que se llevara a cabo una mayor consolidación durante un periodo más largo.

Existen muchas relaciones empíricas entre las propiedades índice del suelo y el índice de compresibilidad, la más aceptada y usada es la de Skempton (1944), en la Tabla 4.9 se muestra las fórmulas conocidas para el cálculo del C_c hasta ahora:

Tabla 4.9 Relaciones empíricas entre el índice de compresibilidad C_c y propiedades geotécnicas del suelo (Singh et al., 2008).

Relación empírica	Propuesta por
$C_c = 0.007(LL - 10)$	Skempton (1944)
$C_c = 0.009(LL - 10)$	Terzaghi y Peck (1984)
$C_c = 1.15(e_f - 0.35)$	Nishida (1956)
$C_c = 0.37(e_0 + 0.003W_L - 0.34)$	Azzouz et al. (1976)
$C_c = 0.40(e_0 - 0.25)$	Azzouz et al. (1976)
$C_c = 0.000463 LL G_s$	Nagraj y Murthy (1985)

Donde LL= límite líquido (%), e_0 = relación de vacíos inicial, e_f = relación de vacíos final, G_s = gravedad específica del suelo.

Singh et al. (2008) evaluando la ecuación de Skempton con los valores de C_c encontrados en los suelos estudiados naturales y contaminados, encontró que la fórmula necesitaba cambiar para el caso de los suelos contaminados, considerando la teoría eléctrica de la doble capa difusa de Gouy (1910) y Chapman (1913) encontró que el espesor de la doble capa disminuirá al disminuir la constante dieléctrica del fluido de poro, la constante dieléctrica de los hidrocarburos del petróleo (<15) son menores que la del agua, 80.4 a 20 °C, por lo que concluyó que el espesor de la doble capa difusa disminuirá, lo que provocará una disminución en el valor de C_c . La viscosidad del fluido de poro influirá en la compresibilidad, por lo que Singh et al. (2008) propusieron agregar un factor F a la ecuación de Skempton para predecir el C_c cuando el fluido de poro es modificado.

$$C_c = 0.007 \left(1 + 0.12 \log \frac{\mu_{cf}}{\mu_w} \right) (LL - 10) \quad (4.1)$$

Donde:

LL= límite líquido en %,

μ_{cf} = viscosidad absoluta del fluido contaminante a 20°C.

μ_w = viscosidad absoluta del agua= $1.00 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ a los 20°C.

Singh et al. (2008) comparo los valores de C_c obtenidos con los valores pronosticados por la ecuación de Skempton modificado, obteniendo valores satisfactorios tanto en estado virgen como contaminado.

Singh et al. (2008) reporta valores de viscosidad cinemática y densidad de la gasolina, en la hoja de seguridad de la gasolina magna de PEMEX no específica la viscosidad del producto, y en la búsqueda se encontraron valores variados reportados que van desde $2.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ a $6.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$, debido a la

incertidumbre de las fuentes consultadas y que el valor usado por Singh et al. (2008) se encuentra entre los encontrados en las literaturas se decidió usar la viscosidad cinemática reportada por Singh et al. (2008) para la predicción del C_c de este estudio, la cual es de $4.29 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$.

Tabla 4.10 Predicción de índice de compresibilidad de acuerdo a Singh et al. (2008).

	<i>LL</i>	<i>Cc acuerdo a Singh et al. (2008)</i>
<i>Natural</i>	81.33	0.468
<i>Contaminado (9 meses)</i>	84.46	0.488

LL= límite líquido (%), C_c = índice de compresibilidad.

De las curvas de compresibilidad obtenidas hasta la carga de 200 kPa, se calculó en índice de compresibilidad del suelo, en la Figura 4-16 se observan las pendientes en las curvas de compresibilidad, para el cálculo del índice de compresibilidad. En la Tabla 4.11 Índice de compresibilidad del suelo natural y contaminado. se tienen los valores de índice de compresibilidad del suelo obtenidos hasta ahorita.

Tabla 4.11 Índice de compresibilidad del suelo natural y contaminado.

	<i>Natural</i>	<i>Contaminado (7 días)</i>	<i>Contaminado (9 meses)</i>
<i>Cc</i>	0.001799	0.002956	0.001606

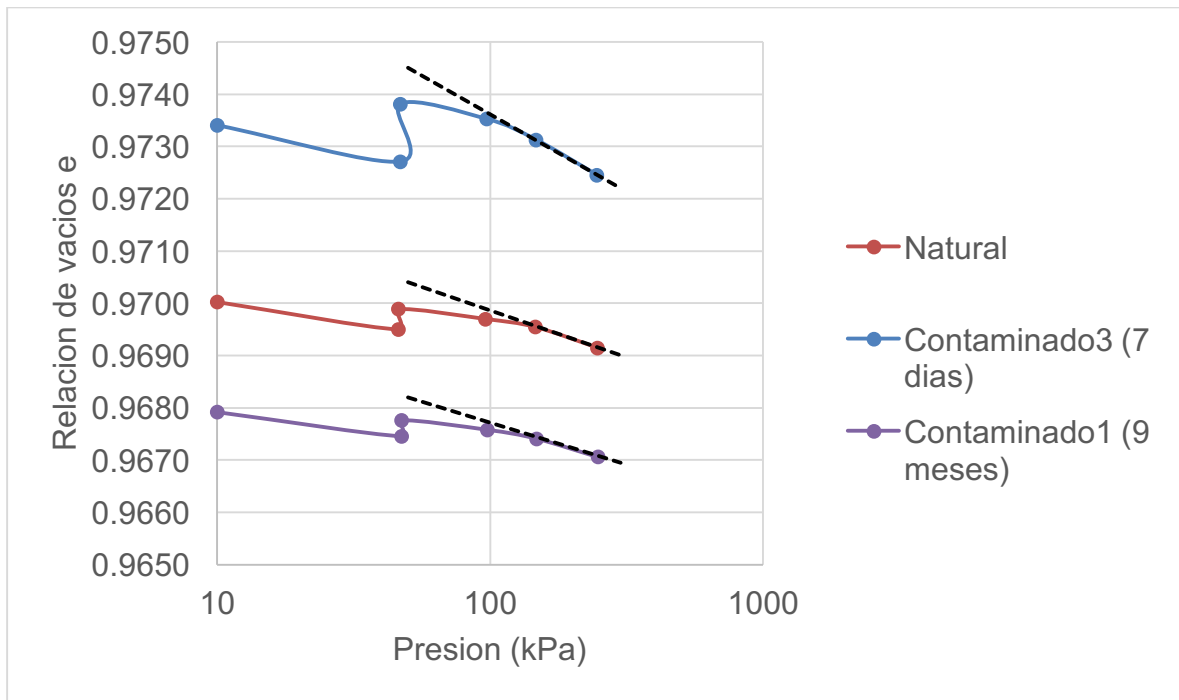


Figura 4-16 Índice de compresibilidad del suelo en función de sus curvas de compresibilidad.

Analizando los valores de C_c de la Tabla 4.11 se observa que el índice de compresibilidad de suelo contaminado a 7 días es mayor que el del suelo natural, y el del suelo contaminado a 9 meses es ligeramente menor que el del suelo natural, y estos valores obtenidos son muy pequeños a los que se calculan con la ecuación propuesta por Singh et al. (2008).

Que el índice de compresibilidad del suelo contaminado a 7 días sea mayor que el del suelo natural, indica que el suelo es más compresible, sin embargo en el suelo contaminado a 9 meses se observa un menor índice de compresibilidad.

Sin embargo en las velocidades de deformación, se observó que el suelo contaminado a 7 días y a 9 meses, presenta una menor velocidad de deformación, con esto y el índice de compresibilidad se concluye que el suelo contaminado a 7 días es más compresible, sin embargo la velocidad de deformación que presentara es menor a la del suelo natural, por lo que se deformara más, pero en mayor tiempo,

en cambio, el suelo contaminado a 9 meses tendrá una menor deformación que el suelo natural.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La modificación observada en la gravedad específica en el suelo contaminado se le atribuye al recubrimiento de las partículas del suelo con gasolina, por lo cual se concluye que la gravedad específica del suelo no cambia en presencia de la gasolina y se consideró el mismo valor en la gravedad específica del suelo natural y del suelo contaminado en este estudio.

La diferencia obtenida en los límites de consistencia no es tan grande como considerar que se tratan de suelos diferentes, la diferencia presentada podría presentarse en la repetición de la prueba. El suelo se tiene la misma clasificación como una arcilla de alta compresibilidad, el cambio en los límites hace que el suelo contaminado se acerca más a la línea A de la carta de plasticidad, por lo que se concluye que el suelo contaminado disminuye en poco su compresibilidad.

En cuanto a la trabajabilidad que presentaba el suelo a la hora de realizar los límites de consistencia, se puede comentar que el suelo contaminado es más fácil de trabajar, es más fácil mover la espátula cuando se realizaron los límites en el suelo contaminado que en el suelo natural.

La granulometría de los suelos natural y contaminado, no presenta variación significativa, se considera el mismo suelo, la variación que se presentó en la cantidad de arcilla y el índice plástico modificó la actividad de la arcilla de 0.75 en el suelo natural a 0.78 en el suelo contaminado, pero continúa siendo una actividad normal.

En el potencial de hidrógeno se observa que el suelo tiende a acidificarse un poco, disminuye su pH en presencia de la gasolina, estos resultados coinciden con lo encontrado con otros autores. El aumento observado en la materia orgánica corresponde al porcentaje de gasolina contenido en el suelo.

Es importante poner atención a la variación presente en la superficie específica, ya que la superficie específica del suelo disminuye en presencia de la gasolina, de la misma forma se podría considerar que, debido a que las partículas de suelo tienen un recubrimiento de gasolina, al momento de realizar el ensaye con azul de metileno, éste no alcanza a cubrir toda la superficie de la partícula debido a que parte de ésta se encuentra envuelta por el hidrocarburo, por esta razón disminuye la superficie específica, sin embargo se tendría que revisar si el azul de metileno no tiene alguna reacción con la gasolina que pudiera impedir o modificar su funcionamiento.

En las curvas de consolidación se observa que la modificación presente en la relación de vacíos y las deformaciones en el suelo natural y el suelo contaminado a 9 meses tienen valores semejantes de deformaciones para las cargas, en cambio en el suelo contaminado a 7 días, la carga que satisface la presión de expansión en el suelo contaminado a 7 días es la carga 2, que corresponde a 100 kPa.

En las curvas de compresibilidad no fue posible apreciar la consolidación secundaria a los 15 días de la carga, por lo cual se obtuvieron las velocidades de deformación presentadas durante la carga, en lo que se observó que las últimas velocidades de deformación presentes en el suelo eran más grandes las del suelo natural, seguida del suelo contaminado a los 9 meses, de ahí el suelo contaminado a los 7 días, por lo cual se concluye que debido a las velocidades de deformación el suelo natural se consolidará más pronto que el suelo contaminado.

En las curvas de compactación se observó que el máximo peso específico seco que es posible alcanzar con la energía de compactación en la prueba Proctor Estándar es menor al peso específico seco in situ, por lo que se concluye que es necesario una mayor energía de compactación para alcanzar el peso específico seco in situ.

También se observó en las curvas de compactación que el máximo peso específico seco en las curvas de compactación del suelo contaminado fue menor al del suelo natural, es posible que esto se deba a la fricción que causa la gasolina entre las partículas del suelo lo que provoca que las partículas ya no se unan entre sí, si no que se deslicen y ya no sea posible compactarlas más o también puede deberse al hecho de que la gasolina ocupa un mayor volumen con menos peso que el agua. La presencia de la gasolina en las partículas del suelo debilita la unión que estas tienen en presencia del agua, lo que hace que se puedan compactar menos.

De la prueba de consolidación se puede concluir que los asentamientos calculados con la velocidad de deformación observada a los 15 días para cada aplicación de carga efectuados en la prueba, son menores en el suelo contaminado que en el suelo natural, por lo que no se cumplió la hipótesis del trabajo, el suelo contaminado tiene menor asentamiento que el suelo natural, sin embargo, debido a que el índice de compresibilidad aumenta en el suelo contaminado se tiene que, el suelo contaminado presentara la misma cantidad de asentamientos que el suelo natural, pero en un periodo mas largo.

No fue posible visualizar la consolidación secundaria en las curvas de consolidación por lo que el objetivo general no se cumplió en su totalidad, sin embargo fue posible obtener velocidades de deformación usando las curvas de consolidación, con las que se pueden aproximar los asentamientos a corto y largo plazo. Si se tiene una casa de dos pisos aproximadamente, considerando la carga de 100 kPa que equivale a 1 kg/cm^2 , se considera una vida útil de 80 años, con las velocidades de deformaciones encontradas se tiene que el suelo natural se asentara 10.57 cm a los 80 años, el suelo expuesto a 7 días de contaminación se asentara 5.48 cm y el contaminado a los 9 meses 7.11 cm.

Sería interesante revisar más a fondo la consolidación del suelo probando con diferentes humedades y la misma cantidad de gasolina para apreciar mejor como afecta el hidrocarburo a la expansión del suelo.

Se recomienda investigar la capacidad de absorción inmediata y a largo plazo de gasolina en el suelo y ver si ésta es proporcional a la masa y cómo cambiaría si el suelo tuviera una humedad inicial.

6. REFERENCIAS

Aiban, S. A. 1998. The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sands. *Environ. Int.* 24:153–161. doi:10.1016/S0160-4120(97)00131-1. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412097001311>

Akinwumi, I. I., D. Diwa, and N. Obianigwe. 2014. Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay. *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.* 3:816–824. doi:10.6088/ijaser.030400007.

Albis, A., A. J. López, and M. C. Romero. 2017. "Removal of methylene blue from aqueous solutions using cassava peel (*Manihot esculenta*) modified with phosphoric acid. *Prospectiva.* 15:60–73. doi:10.15665/rp.v15i2.777. Available from: <http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i2.777>

Amaziah, W. O. 2010. Reduction of the Shear Strength of Soils in the Niger delta area of Nigeria due to crude oil production. *Niger. J. Technol.* 29:130–140.

Antonio Zárate, Y. 2014. Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso. Universidad Autónoma de Querétaro.

ASTM C 128- 12. 2012. "Standard Test Method for Density, relative density (Specific Gravity), and absorption of fine Aggregate." 18.

ASTM C 136-06. 2006. "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregate."

ASTM D 1140-00. 2000. "Standard test methods for amount of material in soils finer

than No. 200 (75 μ m) sieve.”

ASTM D 2216-10. 2016. “Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.” 10.

ASTM D 2435-03. 2003. “Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.” 04:1–10. doi:10.1520/D2435-04.

ASTM D 2974-00. 2011. “Standard Test Methods for Moisture, Ash , and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils.” Annu. B. ASTM Stand. 1–4. doi:10.1520/D2974-07A.2.

ASTM D 4318-10. 2010. “Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.” 22.

ASTM D 4972–01. 2001. “Standard Test Method for pH of Soils.” 01:1–5. doi:10.1520/D4972-13.2.

ASTM D422-07. 2007. “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.” Astm. D422-63:1–8. doi:West Conshohocken, PA. Available from: papers2://publication/uuid/32E2AE22-8555-4A27-B8B6-F7217202A1F2

BARBOSA BASTO, C., and S. ROMERO CAJAMARCA. 2017. Determinación de la superficie específica en suelos caoliníticos y bentoníticos mediante la aplicación de adsorción de azul de metileno aplicando diferentes gradientes térmicos. 67.

Bernal Cortés, A. A. 2015. Remediación de un suelo contaminado con diesel mediante la técnica de lavado ex situ empleando surfactantes a diferentes temperaturas. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS. Available from: <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18235/1/25-1-16835.pdf>

Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto. San José, Costa Rica.

Bian, H., S. Liu, G. Cai, and Y. Chu. 2016. Influence of diesel pollution on the physical properties of soils. *Japanese Geotech. Soc. Spec. Publ.* 2(14):552–555.

Budhu, M. 2011. *SOIL Mechanics AND Foundations*. 3ra Editio. United States of Arizona.

BURFORD, J. R., T. L. DESHPANDE, D. J. GREENLAND, and J. P. QUIRK. 1964. Influence of Organic Materials on the Determination of the Specific Surface Areas of Soils. *J. Soil Sci.* 15:192–201. doi:10.1111/j.1365-2389.1964.tb02218.x.

Cabello-Suárez, L. Y. 2015. Análisis comparativo de curvas de retención de suelos contaminados con gasolina y diésel. Universidad Autónoma de Querétaro.

Cabello-Suárez, L. Y., M. L. Pérez-Rea, R. Galaviz-González, E. Rojas, and C. E. Hernández-Mendoza. 2017a. Impact of diesel contamination on the compressibility of a clayey soil. 13th Int. Eng. Congr. CONIIN 2017. doi:10.1109/CONIIN.2017.7968191.

Cabello-Suárez, L. Y., M. L. Pérez-Rea, R. Galaviz-González, E. Rojas, and C. E. Hernández-Mendoza. 2017b. Evolución de la compresibilidad en el tiempo de un suelo arcilloso contaminado con diésel. XI Coloq. Posgrado la Fac. Ing. 86040.

Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 2014. Reglamento de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. D. Of. la Fed. 61.

Carter, D. L., M. M. Mortland, and W. D. Kemper. 1986. Specific Surface. *Methods Soil Anal. Part 1. Second Ed. Physical and Mineral. Methods.* 9:413–423.

Comisión Nacional del Agua. 2007. Manual de agua potable, alacantarillado y saneamiento, Geotecnia de suelos inestables.

Das, B. M. 2001. *Fundamentos de Ingeniería geotécnica*. 1a ed. (INTERNATIONAL THOMSON, editor.). Mexico.

Das, B. M. 2012. Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. Séptima ed.

Das, B. M. 2014. Advanced Soil Mechanics. Fourth Ed. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/EO066i042p00714-02>

Echeverri-Ramírez, Ó., Y. Valencia-González, D. E. Toscano-Patiño, F. A. Ordoñez-Muñoz, C. Arango-Salas, and S. Osorio-Torres. 2015. Geotechnical behavior of a tropical residual soil contaminated with gasoline Comportamiento geotécnico de un suelo residual tropical contaminado con gasolina. DYNA. 82(190):31–37.

Fernández Serrano, R., J. M. Martínez Santamaría, and J. M. Rogel Quesada. 2012. Variación de la capacidad portante de suelos granulares contaminados con hidrocarburos. In: 9º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Cimentaciones y excavaciones profundas. Sevilla, España. p. 155–162.

Galaviz-González, J. R. 2013. PREDICCIÓN DE ASENTAMIENTOS DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES MEDIANTE ANÁLISIS DE INTERACCIÓN SUELO EXPANSIVO-ESTRUCTURA DE CIMENTACIÓN. Universidad Autónoma de Querétaro.

Gelati, P. R., L. A. Lozano, G. O. Sarli, R. R. Filgueira, and C. G. Soracco. 2009. Influence of the organic matter on the specific surface of a Typic argiudoll | Influencia de la materia orgánica en la superficie específica de un Argiudol típico. Rev. la Fac. Ciencias Agrar. 41:117–126.

George, S., A. Ea, B. Sabu, K. NP, and M. George. 2015. Study on Geotechnical Properties of Diesel Oil Contaminated Soil. 2:113–117.

Giraldo, L., V. García, and J. C. Moreno. 2008. Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados. Rev. Ing. 7–16.

Huaiquilaf, B. C. 2009. Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. Ciencia, Ahorr. (22):20–29.

Huang, F. X., and H. J. Lu. 2014. Experiment study on the atterberg limits of clay contaminated by oil. *Electron. J. Geotech. Eng.* 19:3037–3046.

Ijimdiya, T. S. 2013. The Effects of Oil Contamination on the Consolidation Properties of Lateritic Soil. *Dev. Appl. Ocean. Eng.* 2:53–59.

Izdebska-Mucha, D., and J. Trzciński. 2008. Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *Geologija.* 50:68–74. doi:10.2478/ V 10056-008-0027-0. Available from: <http://www.lmaleidykla.lt/publ/1392-110X/2008/Priedas/S068-S074.pdf>
<http://www.lmaleidykla.lt/publ/1392-110X/2008/Supplement/S068-S074.pdf>

Jia, Y. G., Q. Wu, H. Shang, Z. N. Yang, and H. X. Shan. 2011. The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the Yellow River Delta, China. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 70:517–525. doi:10.1007/s10064-011-0349-8.

Joseph, J., and G. Hari. 2015. Investigation on the Effects of Hydrocarbon Spillage on Soil Properties. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 4:136–140.

Juárez Badillo, E., and A. Rico Rodríguez. 2005. *Fundamentos de la Mecánica de Suelos.*

Kaiser, K., and G. Guggenberger. 2003. Mineral surfaces and soilorganic matter. *Soil Biol. Soil Ecol. Inst. Soil Sci. Plant Nutr. MartinLuther Univ. Halle-wittenb.* 54:219–236. doi:10.1039/b305156k.

Kermani, M., and T. Ebadi. 2012. The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil Sediment Contam. An Int. J.* 21:655–671. doi:10.1080/15320383.2012.672486. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15320383.2012.672486>

Khosravi, E., H. Ghasemzadeh, M. Reza, and H. Yazdani. 2013. Geotechnical

properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Eng. Geol.* 166:11–16.
doi:10.1016/j.enggeo.2013.08.004. Available from:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004>

Liu, Z., S. Liu, and C. Yi. 2015. Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil. *J. Cent. South Univ.* 22(12):4837–4843. doi:10.1007/s11771-015-3035-3.

Martínez M., V. E., and F. López S. 2001. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Tierra Lat.* 19(1):9–17.

Di Matteo, L., F. Bigotti, and R. Ricco. 2011. Compressibility of Kaolinitic Clay Contaminated by Ethanol-Gasoline Blends. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 137:846–849. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000494.

Meegoda, N. J., and P. Ratnaweera. 1994. Compressibility of contaminated fine-grained soils. *Geotech. Test. J.* 17:101–112. doi:10.1520/GTJ10078J.

Mitchell, J. K., K. Soga, and J. Wiley. 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. Third Edit.

Muskus Morales, A. M., C. Santoyo Muñoz, and L. S. Plata Quintero. 2013. Evaluación de las técnicas de atenuación natural, bioventing, bioaumentación y bioaumentación- bioventing, para la biodegradación de diésel en un suelo arenoso, en experimentos en columna. *Gestión y Ambient.* 16:83–94. Available from:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169428420007>

Nasehi, S. A., A. Uromeihy, M. R. Nikudel, and A. Morsali. 2016. Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Fine and Coarse-Grained Soils. *Geotech. Geol. Eng.* 34:333–345. doi:10.1007/s10706-015-9948-7.

Nazir, A. K. 2011. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alexandria Eng. J.* 50:331–335.

doi:10.1016/j.aej.2011.05.002. Available from:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2011.05.002>

Ocampo, D., L. Hernández, Y. Valencia, and O. Echeverri. 2010. Análisis de las alteraciones físicas , químicas , mineralógicas y mecánicas de un suelo residual de Batolito Antioqueño contaminado con gasolina Analysis of physical , chemical , mineralogical and mechanic alterations of a residual soil from Batholith of.

Olchawa, A., and M. Kumor. 2008. Compressibility of Organic Soils Polluted with Diesel Oil. 54:299–307.

Ortínez Brito, O., I. Ize, and A. Gavilán. 2003. La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. Gac. Ecológica. 69:83–92.

Oyegbile, O. B., and G. M. Ayininuola. 2013. Laboratory Studies on the Influence of Crude Oil Spillage on Lateritic Soil Shear Strength : A Case Study of Niger Delta Area of Nigeria. 3:73–83.

Oztoprak, S., and B. Pisirici. 2011. Effects of micro structure changes on the macro behaviour of Istanbul (Turkey) clays exposed to landfill leachate. Eng. Geol. 121:110–122. doi:10.1016/j.enggeo.2011.05.005. Available from:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.05.005>

PEMEX. 2011. Hoja de datos de seguridad PEMEX-MAGNA. Available from:
<http://www.pemex.com/negocio/gasolineras/nuestros-productos/Documents/HDSS-107 Pemex Magna.pdf>

Pérez, G. C., R. A. Iturbe, and R. M. S. Flores. 2006. Cambio en las propiedades físicas de un suelo contaminado con hidrocarburos debido a la aplicación de una tecnología de remediación. AIDIS. 1(1):1–10.

Pradeepan, V. ., V. . Reethi, and N. Namitha. 2016. Effect of Diesel Contamination on Geotechnical Properties of Clay Near Bpcl. Int. J. Civ. Eng. Technol. 7:152–158.

Available from:
<http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp%5Cnhttp://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp%5Cnwww.jifactor.com%5Cnhttp://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=2>

PROFEPA. 2015. Informe de Actividades 2015. Available from:
http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/8233/1/web_versionfinal.pdf

Pusadkar, S. S., and P. S. Bharambe. 2014. Performance of Petrol and Diesel Contaminated Black Cotton Soil. 3:536–539.

Rahman, Z. A., U. Hamzah, M. R. Taha, N. S. Ithnain, and N. Ahmad. 2010. Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil. *Am. J. Appl. Sci.* 7:941–948. Available from:
<http://scipub.org/fulltext/ajas/ajas77954-961.pdf>

Rodríguez, L. S. 2017. Impacto geotécnico de los derrames de diésel en suelos finos.

Sabat, A. K., and S. Mohanta. 2017. Unconfined compressive strength of dolime fine stabilized diesel contaminated expansive soil. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 8:01–08.

Sabroso, M. del C., and A. Pastor. 2004. Guía sobre suelos contaminados. CEPYME Aragón Gob. Aragón. Dep. Econ. Hacienda y Empleo. 7:109. Available from:
http://www.conectapyme.com/files/medio/guia_suelos_contaminados.pdf

Salgado, H., C. Romay, S. M. Zabala, and L. Genova. 1999. Calibracion De Campo De Un Sensor Dielectrico Para Suelos En La Provincia De Buenos Aires.

Santamarina, J. C., K. A. Klein, Y. H. Wang, and E. Prencke. 2002. Specific surface: determination and relevance. *Can. Geotech. J.* 39:233–241. doi:10.1139/t01-077. Available from: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/t01-077>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. 2012. Guía

Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestras Finales Comprobatorias.

SEMARNAT. 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. 2013. 360. Available from: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf

SEMARNAT. 2016. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 20. (Semarnat, editor.). México.

Singh, S. K., R. K. Srivastava, and S. John. 2008. Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil Sediment Contam.* 17. doi:10.1080/15320380802007028.

Tosoni, G. A. 2007. La macroeconomía de los hidrocarburos en México y sus relaciones intersectoriales. *Probl. Desarro.* 38(150):167–192.

Vázquez, L. O. A. 1999. SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DETERGENTE- DISPERSANTE EN GASOLINA OXIGENADA DE α -POLIALQUENILSUCCINIMIDAS. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Vélez, A. A. A., and C. F. Suárez. 2017. Determinación del proceso de estabilización de las propiedades mecánicas, para un suelo areno-arcilloso contaminado con gasolina. Universidad de Catagena.

Wagai, R., L. M. Mayer, and K. Kitayama. 2009. Extent and nature of organic coverage of soil mineral surfaces assessed by a gas sorption approach. *Geoderma.* 149:152–160. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.032. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.11.032>

7. APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO NATURAL

7.1 Humedad natural

No cápsula	$W_{cáp}$ (g)	$W_{cáp} + W_{suelo\ húm}$ (g)	$W_{suelo\ húm}$ (g)	$W_{cáp} + W_{suelo\ seco}$ (g)	$W_{suelo\ seco}$ (g)	W_{agua} (g)	w%
2	131.1	234.5	103.4	209.0	77.9	25.5	32.73
3	130.8	222.3	91.5	199.6	68.8	22.7	33.03
Promedio=							32.88

7.2 Gravedad específica

Tablas de peso y temperatura del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración.

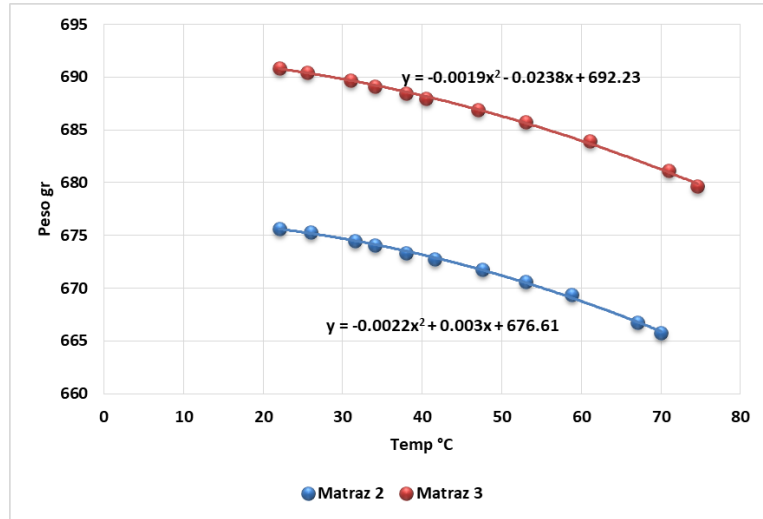
Matraz 2

Peso (g)	665.73	666.79	669.4	670.63	671.73	672.76	673.29	674.07	674.5	675.31	675.64
Temp (°C)	70	67	58.8	53	47.5	41.5	38	34	31.5	26	22

Matraz 3

Peso (g)	679.64	681.11	683.92	685.74	686.91	687.98	688.45	689.15	689.69	690.47	690.86
Temp (°C)	74.6	71	61	53	47	40.5	38	34	31	25.5	22

Grafica de curvas de calibración de matraces y ecuaciones correspondientes a las curvas de calibración.



Datos obtenidos del suelo natural y cálculo de gravedad específica.

ENSAYO No. 1

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T_t	---	23.2
Masa matraz + agua + suelo	g	$M_{pws,t}$	---	731.6
Masa suelo seco	g	M_s	---	66.57
Masa agua en el matraz a t °C	g	$M_{pw,t}$	---	690.66
Gravedad específica a t °C	---	G_t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5978
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9993
GS a 20 °C	---	$G_{1@20^\circ C}$	$G_{1@20^\circ C} = (K * G_t)$	2.5960

ENSAYO No. 2

Matraz No.	---	---	---	2
Temperatura de ensayo	°C	T_t	---	23.2
Masa matraz + agua + suelo	g	$M_{pws,t}$	---	716.62
Masa suelo seco	g	M_s	---	66.95
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	675.50
Gravedad específica a t °C	---	G_t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5924
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9993
GS a 20 °C	---	$G_{1@20^\circ C}$	$G_{1@20^\circ C} = (K * G_t)$	2.5906

ENSAYO No. 3

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T _t	---	22
Masa matraz + agua + suelo	g	M _{pws,t}	---	731.91
Masa suelo seco	g	M _s	---	66.64
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	690.79
Gravedad específica a t °C	---	G _t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.6116
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9996
GS a 20 °C	---	G _{1@20°C}	G _{1@20°C} = (K * G _t)	2.6105

ENSAYO No. 1	
G _s =	2.596

ENSAYO No. 2	
G _s =	2.591

ENSAYO No. 3	
G _s =	2.610

PROMEDIO =	2.599
------------	-------

Tabla: Densidad del agua y coeficiente de temperatura (k) para varias temperaturas.								
Temperatura °C	Densidad g/ml	Coeficiente temperatura K	Temperatura °C	Densidad g/ml	Coeficiente temperatura K	Temperatura °C	Densidad g/ml	Coeficiente temperatura K
15	0.9991	1.0009	20.3	0.99814	0.99994	25.6	0.99689	0.99868
15.1	0.99909	1.00088	20.4	0.99812	0.99992	25.7	0.99687	0.99866
15.2	0.99907	1.00087	20.5	0.9981	0.9999	25.8	0.99684	0.99863
15.3	0.99906	1.00085	20.6	0.99808	0.99987	25.9	0.99681	0.9986
15.4	0.99904	1.00084	20.7	0.99806	0.99985	26	0.99679	0.99858
15.5	0.99902	1.00082	20.8	0.99804	0.99983	26.1	0.99676	0.99855
15.6	0.99901	1.0008	20.9	0.99802	0.99981	26.2	0.99673	0.99852
15.7	0.99899	1.00079	21	0.99799	0.99979	26.3	0.99671	0.9985
15.8	0.99898	1.00077	21.1	0.99797	0.99977	26.4	0.99668	0.99847
15.9	0.99896	1.00076	21.2	0.99795	0.99974	26.5	0.99665	0.99844
16	0.99895	1.00074	21.3	0.99793	0.99972	26.6	0.99663	0.99842
16.1	0.99893	1.00072	21.4	0.99791	0.9997	26.7	0.9966	0.99839
16.2	0.99891	1.00071	21.5	0.99789	0.99968	26.8	0.99657	0.99836
16.3	0.99889	1.00069	21.6	0.99786	0.99966	26.9	0.99654	0.99833
16.4	0.99888	1.00067	21.7	0.99784	0.99963	27	0.99652	0.9983
16.5	0.99886	1.00066	21.8	0.99782	0.99961	27.1	0.99649	0.99827
16.6	0.99885	1.00064	21.9	0.9978	0.99959	27.2	0.99646	0.99824
16.7	0.99883	1.00062	22	0.99777	0.99957	27.3	0.99643	0.99821
16.8	0.99881	1.00061	22.1	0.99775	0.99954	27.4	0.99641	0.99818

Tabla: Densidad del agua y coeficiente de temperatura (k) para varias temperaturas.								
Temperatura °C	Densidad g/ml	Coeficiente temperatura K	Temperatura °C	Densidad g/ml	Coeficiente temperatura K	Temperatura °C	Densidad g/ml	Coeficiente temperatura K
16.9	0.99879	1.00059	22.2	0.99773	0.99952	27.5	0.99638	0.99817
17	9.9978	1.00057	22.3	0.9977	0.9995	27.6	0.99635	0.99814
17.1	0.99876	1.00055	22.4	0.99768	0.99947	27.7	0.99632	-99811
17.2	0.99874	1.00054	22.5	0.99766	0.99945	27.8	0.99629	0.99808
17.3	0.99872	1.00052	22.6	0.99764	0.99943	27.9	0.99627	0.99806
17.4	0.99871	1.0005	22.7	0.99761	0.9994	28	0.99624	0.99803
17.5	99869	1.00048	22.8	0.99759	0.99938	28.1	0.99621	0.998
17.6	0.99867	1.00047	22.9	0.99756	0.99936	28.2	0.99618	0.99797
17.7	0.99865	1.00045	23	0.99754	0.99933	28.3	0.99615	0.99794
17.8	99863	1.00043	23.1	0.99752	0.99931	28.4	0.99612	0.99791
17.9	0.99862	1.00041	23.2	0.99754	0.99929	28.5	0.99609	0.99788
18	0.9986	1.00039	23.3	0.99752	0.99926	28.6	0.99607	0.99785
18.1	0.99858	1.00037	23.4	0.99749	0.99924	28.7	0.99604	0.99783
18.2	0.99856	1.00035	23.5	0.99747	0.99921	28.8	0.99601	0.9978
18.3	0.99854	1.00034	23.6	0.99745	0.99919	28.9	0.99598	0.99777
18.4	0.99852	1.00032	23.7	0.99742	0.99917	29	0.99595	0.99774
18.5	0.9985	1.0003	23.8	0.9974	0.99914	29.1	0.99592	0.99771
18.6	0.99848	1.00028	23.9	0.99737	0.99912	29.2	0.99589	0.99768
18.7	0.99847	1.00026	24	0.99735	0.99909	29.3	0.99586	0.99765
18.8	99845	1.00024	24.1	0.99732	0.99907	29.4	0.99583	0.99762
18.9	0.99843	1.00022	24.2	0.9973	0.99904	29.5	0.9958	0.99759
19	0.99841	1.0002	24.3	0.99727	0.99902	29.6	0.99577	0.99756
19.1	0.99839	1.00018	24.4	0.99725	0.99899	29.7	0.99574	0.99753
19.2	0.99837	1.00016	24.5	0.99717	0.99897	29.8	0.99571	0.9975
19.3	0.99835	1.00014	24.6	0.99715	0.99894	29.9	0.99568	0.99747
19.4	99833	1.00012	24.7	0.99712	0.99892	30	0.99565	0.99744
19.5	0.99831	1.0001	24.8	0.9971	0.99889	30.1	0.99562	0.99741
19.6	0.99829	1.00008	24.9	0.99707	0.99887	30.2	0.99559	0.99738
19.7	0.99827	1.00006	25	0.99705	0.99884	30.3	0.99556	0.99735
19.8	0.99825	1.00004	25.1	0.99702	0.99881	30.4	0.99553	0.99732
19.9	0.99823	1.00002	25.2	0.997	0.99879	30.5	0.9955	0.99729
20	99821	1	25.3	0.99697	0.99876	30.6	0.99547	0.99726
20.1	0.99819	0.99998	25.4	0.99694	0.99874	30.7	0.99544	0.99723
20.2	0.99816	0.99996	25.5	0.99692	0.99874	30.8	0.99541	0.9972
						30.9	0.99538	0.99716

7.3 Relaciones volumétricas y gravimétricas

Tablas de datos para el cálculo de relaciones volumétricas y gravimétricas.

PROMEDIO

Υ_m	gr/cm ³	1.75
Υ_d	gr/cm ³	1.32
e	---	0.97
w	%	32.88
n	%	49.29
G _w	%	87.95

MUESTRA 1

Flanera	---	2.00
W _{flanera}	gr	125.06
W _{muestra nat + flanera}	gr	225.25
W _{muestra nat}	gr	100.19
W _{muestra seca + flanera}	gr	200.50
W _{muestra seca}	gr	75.44
w _{nat}	%	32.81
W _{fondo}	gr	86.35
W _{mercurio + fondo}	gr	855.60
W _{mercurio}	gr	769.25
Y _{mercurio}	gr/cm ³	13.58
Vol _{suelo}	cm ³	56.65
Y _o	gr/cm ³	1.00
Y _m	gr/cm ³	1.77
Y _d	gr/cm ³	1.33
G _s	gr/cm ³	2.60
e	---	0.95
n	%	48.76
G _w	%	89.61

Volumenes cm ³		Pesos gr	
	V _a	W _a	
	2.87	0	
V _m	V _v	W _w	W _m
56.65	27.62	24.75	100.19
	V _s	W _s	
	29.03	75.44	

MUESTRA 2

Flanera	gr	B2
W flanera	gr	121.66
W muestra nat + flanera	gr	213.54
W muestra nat	gr	91.88
W muestra seca + flanera	gr	190.77
W muestra seca	gr	69.11
w nat	%	32.95
W fondo	gr	86.35
W mercurio + fondo	gr	801.14
W mercurio	gr	714.79
Y mercurio	gr/cm3	13.58
Vol suelo	cm3	52.64
Y_o	gr/cm3	1.00
Y_m	gr/cm3	1.75
Y_d	gr/cm4	1.31
G_s	gr/cm3	2.60
e	---	0.98
n	%	49.48
G_w	%	87.43

Volumenes cm3		Pesos gr		
V _m	V _v	V _a	W _a	W _m
		3.27	0	
	26.04	V _w	W _w	
52.64	22.77	22.77		
		V _s	W _s	
		26.59	69.11	

MUESTRA 3

Flanera	gr	B2
W flanera	gr	126.79
W muestra nat + flanera	gr	184.65
W muestra nat	gr	57.86
W muestra seca + flanera	gr	170.33
W muestra seca	gr	43.54
w nat	%	32.89
W fondo	gr	86.32
W mercurio + fondo	gr	537.86
W mercurio	gr	451.54
Y mercurio	gr/cm3	13.58
Vol suelo	cm3	33.25
Y_o	gr/cm3	1.00
Y_m	gr/cm3	1.74
Y_d	gr/cm4	1.31
G_s	gr/cm3	2.60
e	---	0.98
n	%	49.62
G_w	%	86.80

Volumenes cm3		Pesos gr		
V _m	V _v	V _a	W _a	W _m
		2.18	0	
	16.50	V _w	W _w	
33.25	14.32	14.32		
		V _s	W _s	
		16.75	43.54	

7.4 Límites de consistencia

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYE NO 1 (COPA CASAGRANDE)

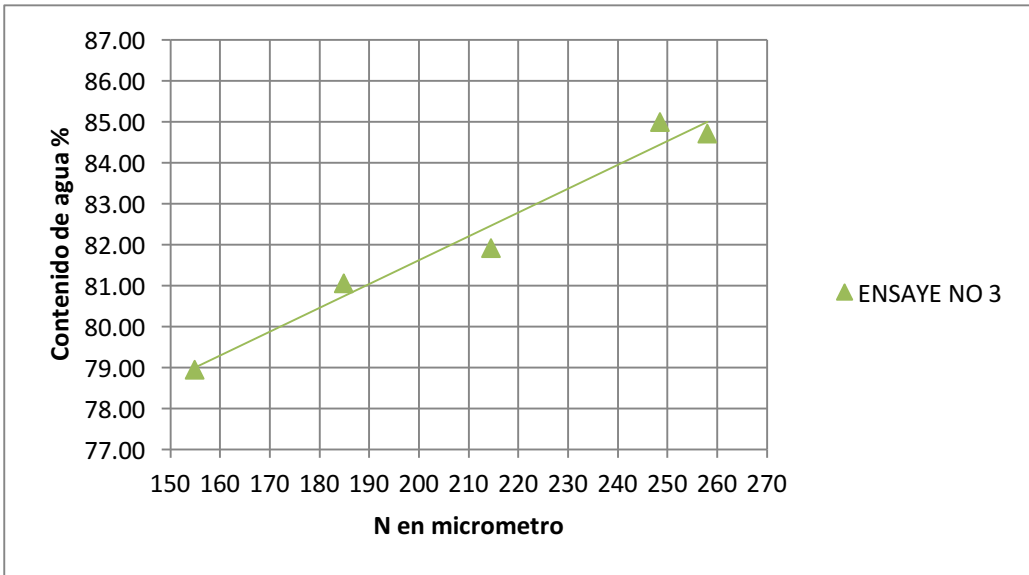
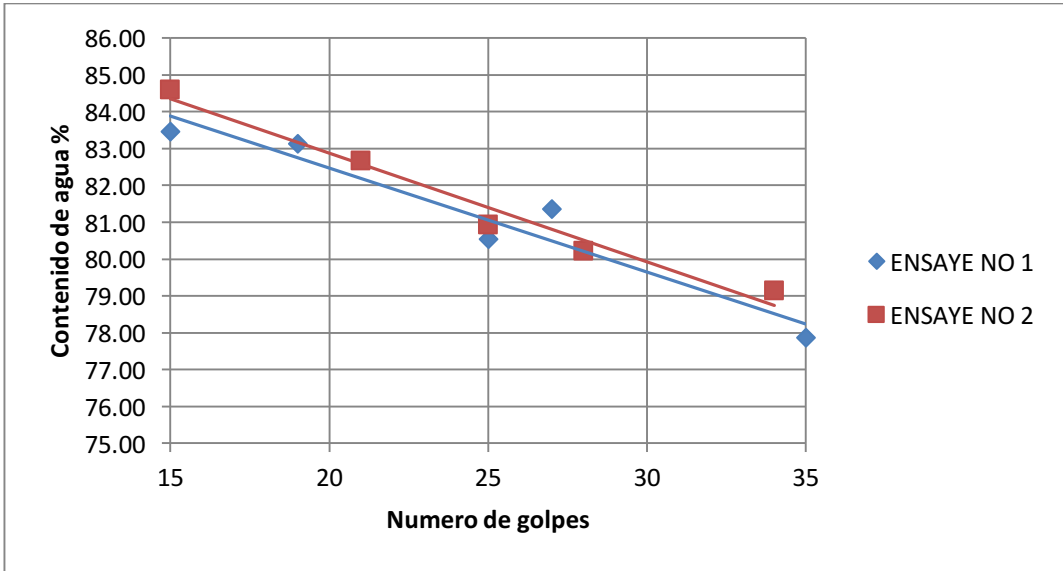
No golpes	Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%
35	1	52.65	40.01	12.64	23.78	16.23	77.88
27	3	152.29	140.15	12.14	125.23	14.92	81.37
25	2	156	142.25	13.75	125.18	17.07	80.55
19	2	41.18	31.52	9.66	19.9	11.62	83.13
15	5	150.85	139.69	11.16	126.32	13.37	83.47

ENSAYE NO 2 (COPA CASAGRANDE)

No golpes	Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%
34	21	47.36	36.01	11.35	21.67	14.34	79.15
28	21'	47.52	34.3	13.22	17.82	16.48	80.22
25	4v	42.12	34.61	7.51	25.33	9.28	80.93
21	R	151.48	138.98	12.5	123.86	15.12	82.67
15	4	139.46	130.13	9.33	119.1	11.03	84.59

ENSAYE NO 3 (CONO INGLES)

N en micrómetro	Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%
155	2'	20.56	15.26	5.31	8.54	6.72	78.94
185	19c	14.31	9.39	4.93	3.31	6.08	81.05
214.5	10c	15.67	10.14	5.52	3.40	6.74	81.93
248.5	5	14.52	9.41	5.11	3.40	6.01	85.00
258	2c	13.34	8.78	4.56	3.40	5.38	84.72



LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYE NO 1

Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%	w% promedio
15	127.98	124.95	3.03	116.08	8.87	34.16	34.25
221	138.03	134.96	3.07	126.02	8.94	34.34	

ENSAYE NO 2

Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%	w% promedio
77	140.61	137.73	2.88	129.36	8.37	34.43	34.28
SN	130.72	127.93	2.79	119.75	8.18	34.13	

ENSAYE NO 3

Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%	w% promedio
58A	140.22	137.46	2.76	129.42	8.04	34.34	34.12
4P	129.92	127.27	2.66	119.43	7.83	33.91	

CONTRACCIÓN LINEAL (CL %)

ENSAYE NO 1

Long. Inicial (cm)	10.06
Long. Final (cm)	7.86
CL (%)	21.89

ENSAYE NO 2

Long. Inicial (cm)	9.89
Long. Final (cm)	7.84
CL (%)	20.69

ENSAYE NO 3

Long. Inicial (cm)	9.95
Long. Final (cm)	7.95
CL (%)	20.14

LÍMITE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA

ENSAYE NO 1

# cápsula	SN	W _{cáp}	18.58
W _{cáp} + W _{suelo húm} (g)	55.67	W _{cáp} + W _{suelo seco} (g)	39.12
W _{suelo húm} (g)	37.09	W _{suelo seco} (g)	20.54

ENSAYE NO 2

# cápsula	SN	W _{cáp}	18.58
W _{cáp} + W _{suelo húm} (g)	56.53	W _{cáp} + W _{suelo seco} (g)	40.16
W _{suelo húm} (g)	37.95	W _{suelo seco} (g)	21.58

Vol. Inicial (cm3)	23.77	W fondo (g)	86.34
W fondo + mercurio (g)	246.66	W mercurio (g)	160.32
Y mercurio (g/cm3)	13.58	Vol. final (cm3)	11.81
Y agua (g/cm3)	1.00		

Vol. Inicial (cm3)	25.14	W fondo (g)	90.50
W fondo + mercurio (g)	250.70	W mercurio (g)	160.20
Y mercurio (g/cm3)	13.58	Vol. final (cm3)	11.80
Y agua (g/cm3)	1.00		

CV (%)	12.37
---------------	--------------

CV (%)	13.99
---------------	--------------

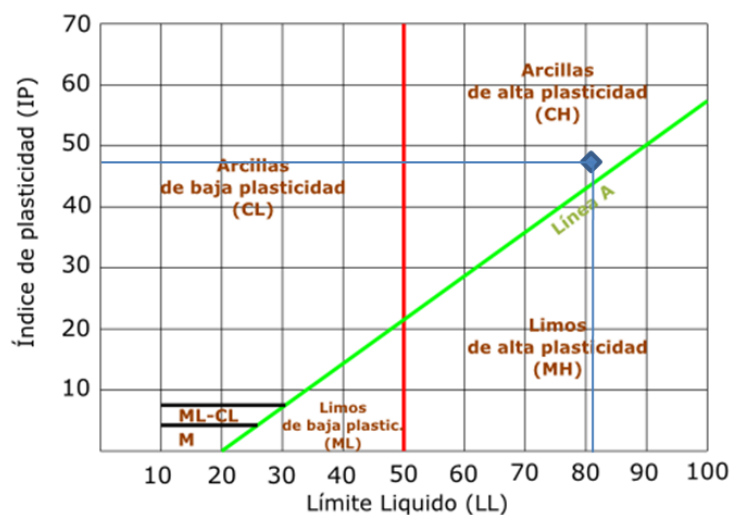
ENSAYE NO 3

# cápsula	21' 2	W cáp	17.82
W cáp + W suelo húm (g)	66.66	W cáp + W suelo seco (g)	46.38
W suelo húm (g)	48.84	W suelo seco (g)	28.56
Vol. Inicial (cm3)	31.79	W fondo (g)	94.02
W fondo + mercurio (g)	300.73	W mercurio (g)	206.71
Y mercurio (g/cm3)	13.58	Vol. final (cm3)	15.22
Y agua (g/cm3)	1.00		

CV (%)	13.01
---------------	--------------

	ENSAYE NO 1	ENSAYE NO 2	ENSAYE NO 3	PROMEDIO
LL=	81.00%	81.40%	81.60%	81.33%
LP=	34.25%	34.28%	34.12%	34.22%
lp=	46.75%	47.12%	47.48%	47.12%
CL=	21.89%	20.69%	20.14%	20.91%
CV=	12.37%	13.99%	13.01%	13.12%

Gráfica de plasticidad del USCS



7.5 Análisis granulométrico

SUELO MAS FINO QUE 75 μm (malla No. 200)

MATERIAL ANTES DEL LAVADO

# cápsula	2	$W_{\text{cáp}}$	473.7 g
$W_{\text{cáp}} + W_{\text{suelo seco}}$	875.7 g		
$W_{\text{suelo seco}}$	402 g		

MATERIAL DESPUÉS DEL LAVADO

# cápsula	3v	$W_{\text{cáp}}$	24.91 g
$W_{\text{cáp}} + W_{\text{suelo seco}}$	32.76 g		
$W_{\text{suelo seco}}$	7.85 g		
% de material más fino que la malla No. 200			98.05 %

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Malla	Abertura	Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
No.	mm	g	%	%
1/4 in	6.35	0	0.00	100.00

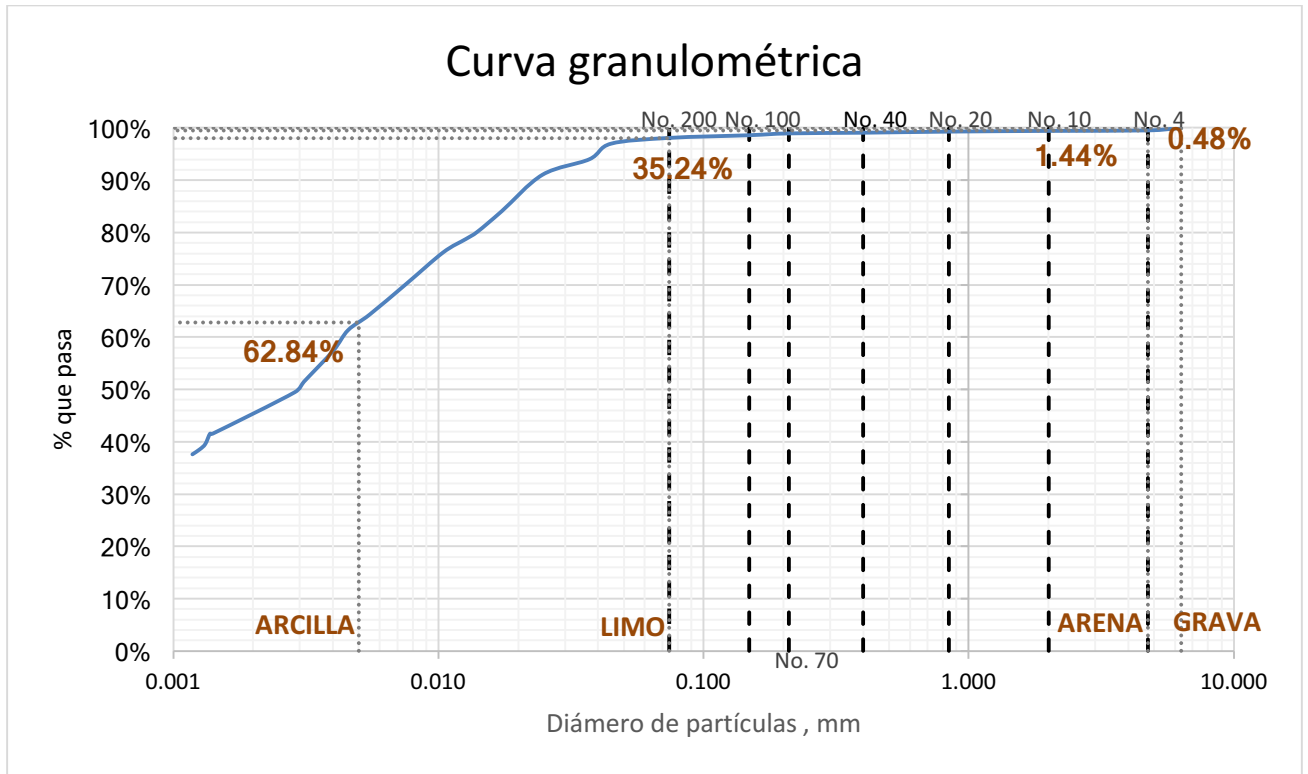
No. 4	4.750	1.91	0.48	99.52
Pasa No. 4	---	400.09	99.52	---
SUMA	---	402	---	---
No. 10	2.000	0.37	0.09	99.43
No. 20	0.840	0.55	0.14	99.30
No. 40	0.400	0.85	0.21	99.08
No. 60	0.250	0.52	0.13	98.96
No. 100	0.149	1.4	0.35	98.61
No. 200	0.074	2.09	0.52	98.09
Pasa No. 200	---	394.15	98.05	---
SUMA	---	401.84	99.96	---

PERDIDA	0.16	g	0.04	%
---------	------	---	------	---

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	
MASA TOTAL (g)	402
PASA No. 200 (g)	394.15
MASA ENSAYADA (g)	50
G _s =	2.599

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDRÓMETRO

FECHA	HORA	TIEMPO TRANS	LECTURA HIDRÓMETRO (SUELO), R	TEMPERATUR A °C	LECTURA (CON DEFLOCULANTE)	LECTURA CORREGIDA	FACTOR a	% SUELO EN SUSPENSIÓN	MASA SUELO EN SUSPENSIÓN g	L EFECTIV A	K VALOR	DIÁMETRO DE PARTÍCULA EN mm	% EN RELACIÓN AL TOTAL
20170622	13:46	0.67 min	53	23.5	4	49	1.01	98.92%	49.46	7.6	0.0133	0.0449	96.99%
	13:47	1 min	51.5	23.5	4	47.5	1.01	95.89%	47.95	7.9	0.0133	0.0372	94.02%
	13:48	2.33 min	50	23.5	4	46	1.01	92.86%	46.43	8.1	0.0133	0.0247	91.05%
	13:51	5 min	47	23.5	4.5	42.5	1.01	85.80%	42.90	8.6	0.0133	0.0174	84.12%
	13:54	8 min	45	23.2	4.5	40.5	1.01	81.76%	40.88	8.9	0.0133	0.0141	80.16%
	13:56	10 min	44	23	4.2	39.8	1.01	80.35%	40.17	9.1	0.0134	0.0127	78.78%
	14:01	15 min	43.5	23	5	38.5	1.01	77.72%	38.86	9.2	0.0134	0.0104	76.21%
	14:16	30 min	40	23	4.5	35.5	1.01	71.67%	35.83	9.7	0.0134	0.0076	70.27%
	14:46	60 min	37	23	4.5	32.5	1.01	65.61%	32.81	10.2	0.0134	0.0055	64.33%
	15:16	90 min	35	23	4	31	1.01	62.58%	31.29	10.6	0.0134	0.0046	61.36%
	16:16	120 min	34	22.5	5	29	1.01	58.54%	29.27	10.7	0.0134	0.0040	57.40%
	17:20	214 min	31	21.5	5	26	1.01	52.49%	26.24	11.2	0.0136	0.0031	51.46%
	18:00	254 min	30	21.5	5	25	1.01	50.47%	25.23	11.4	0.0136	0.0029	49.48%
	20170623	08:51	1144 min	26	20.5	5	21	1.01	42.39%	21.20	12.0	0.0138	0.0014
09:46		1200 min	26	20.5	5	21	1.01	42.39%	21.20	12.0	0.0138	0.0014	41.57%
11:46		1320 min	25	20.5	5	20	1.01	40.38%	20.19	12.2	0.0138	0.0013	39.59%
13:46		1440 min	24.5	21	5	19.5	1.01	39.37%	19.68	12.3	0.0137	0.0013	38.60%
17:20		1654 min	24	21	5	19	1.01	38.36%	19.18	12.4	0.0137	0.0012	37.61%



7.6 Materia orgánica

Contenido de materia orgánica

No cápsula	W _{cáp} (g)	W _{cáp} + W _{suelo} (g)	W _{suelo} (g)	W _{cáp} + W _{suelo} seco (g)	W _{suelo} seco (g)	W _{MO} (g)	MO%
1	9.3	30.0	20.7	28.9	19.5	1.2	5.89
2	9.4	29.8	20.4	28.7	19.2	1.2	6.03
3	9.3	29.5	20.2	28.4	19.1	1.2	6.08
Promedio=							5.96

7.7 Potencial de hidrógeno, pH.

Potencial de hidrógeno			
Fecha	Hora	Temperatura	pH
27 de Enero del 2018	15:08	19.9 °C	7.93
27 de Enero del 2018	16:28	20.8 °C	7.88

31 de Enero del 2018	15:46	16.3 °C	8.00
31 de Enero del 2018	16:18	16.3 °C	7.97
Promedio			7.94

7.8 Superficie específica.

Fecha	mL consumidos	N incrementos de 0.5 mL	Superficie específica (Se) m ² /g
11 de Julio del 2018	28	56	685.39
11 de Julio del 2018	29	58	709.87
12 de Julio del 2018	29	58	709.87
12 de Julio del 2018	27	54	660.92
Promedio			691.51

8. APÉNDICE A. PROPIEDADES SUELO CONTAMINADO

8.1 Contenido de gasolina

Calculo de contenido de gasolina secando el suelo.

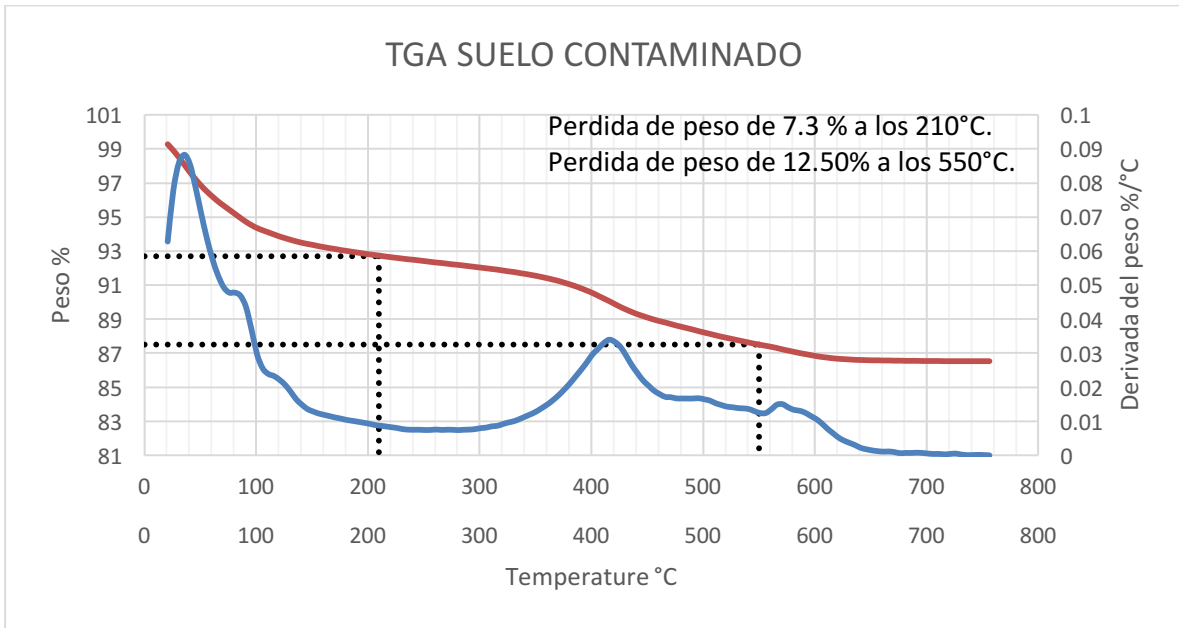
<i>Temperatura</i>	W_{suelo húmedo} (g)	W_{suelo seco} (g)	W_{gasolina} (g)	ω_{gasolina} (%)
100°C	98.93	94.53	4.4	4.65
210°C	98.93	93.18	5.75	6.17

Datos obtenidos del análisis termogravimétrico.

Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min	Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min	Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min
16				146	93.42	0.01357	26.37	276	92.22	0.007487	52.39
21	99.27	0.06274	1.31	151	93.36	0.01287	27.37	281	92.19	0.007398	53.39
26	98.91	0.07765	2.34	156	93.29	0.01227	28.37	286	92.15	0.007504	54.39
31	98.5	0.08582	3.36	161	93.23	0.01187	29.38	291	92.11	0.007545	55.39
36	98.06	0.08822	4.36	166	93.17	0.01148	30.38	296	92.07	0.007697	56.39
41	97.62	0.0853	5.37	171	93.12	0.01109	31.38	301	92.03	0.007974	57.39
46	97.21	0.07854	6.37	176	93.06	0.01077	32.38	306	91.99	0.008142	58.39
51	96.83	0.07092	7.37	181	93.01	0.01038	33.38	311	91.95	0.008516	59.39
56	96.5	0.06371	8.37	186	92.96	0.01013	34.38	316	91.91	0.008657	60.39
61	96.2	0.05764	9.37	191	92.91	0.009856	35.38	321	91.86	0.009203	61.39
66	95.92	0.05284	10.37	196	92.86	0.009574	36.38	326	91.81	0.009653	62.39
71	95.67	0.04937	11.37	201	92.81	0.009286	37.38	331	91.77	0.01004	63.39
76	95.43	0.04775	12.37	206	92.77	0.008908	38.38	336	91.71	0.01068	64.38
81	95.19	0.04775	13.37	211	92.73	0.008697	39.38	341	91.66	0.0114	65.38
86	94.95	0.04685	14.37	216	92.68	0.008478	40.38	346	91.6	0.0121	66.38
91	94.72	0.04356	15.37	221	92.64	0.008244	41.38	351	91.54	0.01291	67.39
96	94.52	0.03684	16.37	226	92.6	0.00802	42.38	356	91.47	0.01394	68.38
101	94.35	0.02957	17.37	231	92.56	0.007697	43.39	361	91.4	0.01501	69.38
106	94.22	0.0255	18.37	236	92.52	0.007533	44.38	366	91.32	0.01629	70.38
111	94.1	0.02388	19.37	241	92.49	0.0075	45.38	371	91.24	0.01774	71.38
116	93.98	0.02327	20.37	246	92.45	0.007504	46.38	376	91.14	0.0194	72.39
121	93.86	0.02217	21.37	251	92.41	0.007425	47.38	381	91.04	0.02119	73.38
126	93.76	0.02069	22.37	256	92.37	0.007445	48.39	386	90.93	0.02319	74.38
131	93.66	0.01866	23.37	261	92.33	0.007557	49.39	391	90.81	0.02519	75.38
136	93.57	0.01641	24.37	266	92.3	0.007441	50.39	396	90.68	0.02733	76.38
141	93.49	0.01487	25.37	271	92.26	0.007515	51.39	401	90.54	0.02964	77.38

Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min	Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min	Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min
406	90.38	0.03125	78.38	536	87.7	0.01376	104.37	666	86.58	0.001123	130.36
411	90.22	0.03294	79.38	541	87.63	0.01355	105.37	671	86.57	0.0009394	131.36
416	90.06	0.03393	80.38	546	87.56	0.01292	106.37	676	86.57	0.0006195	132.36
421	89.89	0.03326	81.38	551	87.5	0.01239	107.37	681	86.56	0.0007009	133.36
426	89.72	0.03179	82.38	556	87.44	0.01241	108.37	686	86.56	0.0006823	134.36
431	89.57	0.02928	83.38	561	87.38	0.01353	109.37	691	86.56	0.0007648	135.36
436	89.43	0.02651	84.38	566	87.31	0.01487	110.37	696	86.55	0.0006878	136.36
441	89.3	0.02421	85.38	571	87.23	0.01499	111.37	701	86.55	0.000518	137.36
446	89.19	0.02203	86.38	576	87.16	0.01407	112.37	706	86.55	0.0003883	138.36
451	89.08	0.02048	87.38	581	87.09	0.01335	113.37	711	86.55	0.0004067	139.36
456	88.98	0.01896	88.38	586	87.02	0.01309	114.37	716	86.54	0.0002769	140.36
461	88.89	0.01797	89.38	591	86.96	0.01252	115.37	721	86.54	0.0004059	141.36
466	88.81	0.01715	90.38	596	86.9	0.01157	116.37	726	86.54	0.0005014	142.36
471	88.72	0.01705	91.38	601	86.84	0.01064	117.37	731	86.54	0.0002152	143.36
476	88.63	0.0167	92.38	606	86.79	0.009365	118.37	736	86.54	0.00006102	144.36
481	88.55	0.01668	93.38	611	86.75	0.00781	119.37	741	86.54	0.00007972	145.36
486	88.47	0.01666	94.38	616	86.71	0.006504	120.37	746	86.54	0.000127	146.36
491	88.39	0.01667	95.38	621	86.68	0.005202	121.37	751	86.54	0.00007241	147.36
496	88.3	0.01675	96.38	626	86.66	0.004302	122.37	756	86.54	0.000003393	148.36
501	88.22	0.01643	97.38	631	86.64	0.003625	123.37	761	86.54	-0.0001289	149.36
506	88.14	0.01605	98.38	636	86.62	0.002958	124.37	766	86.54	-0.0002719	150.36
511	88.06	0.01529	99.38	641	86.61	0.002172	125.37	771	86.54	-0.0001723	151.36
516	87.98	0.01478	100.38	646	86.6	0.001755	126.37	776	86.54	-0.000187	152.36
521	87.91	0.01429	101.38	651	86.59	0.001443	127.37	781	86.54	-0.0002847	153.36
526	87.84	0.01412	102.38	656	86.59	0.001218	128.36	786	86.54	-0.0004111	154.35
531	87.77	0.01386	103.37	661	86.58	0.001076	129.37	791	86.55	-0.0003755	155.35

Temperature °C	Weight %	Deriv. Weight %/°C	Time min
796	86.54	-0.0003312	156.35
801	86.55	-0.0005713	157.35
806	86.55	-0.000535	158.35
811	86.55	-0.0008019	159.35
816	86.56	-0.000849	160.35
821	86.57	-0.001223	161.35
826	86.57	-0.001408	162.35
831	86.58	-0.001481	163.35
836	86.59	-0.001762	164.35
841	86.59	-0.001642	165.35
846	86.6	-0.001552	166.35
851	86.61	-0.001723	167.35
856	86.62	-0.00193	168.35
861	86.63	-0.001832	169.35
866	86.64	-0.001556	170.35
871	86.65	-0.001398	171.35
876	86.65	-0.001082	172.35
881	86.65	-0.0008644	173.35
886	86.66	-0.0009595	174.35
891	86.67	-0.0007018	175.35
896	86.67	-0.00017	176.35



Calculo de la gasolina que queda en el suelo después de obtener la gravedad específica.

$$G_s = \frac{W_{ss} + W_g}{(V_{ss} + V_g)\gamma_0}$$

$$2.534 = \frac{W_{ss} + W_g}{\left(\frac{W_{ss}}{2.599 \text{ gr/cm}^3} + \frac{W_g}{0.78 \text{ gr/cm}^3}\right) 1 \text{ gr/cm}^3}$$

$$2.534 = \frac{W_{ss} + W_g}{0.3848W_{ss} + 1.282W_g}$$

$$0.975W_{ss} + 3.249W_g = W_{ss} + W_g$$

$$W_g = 0.0111W_{ss}$$

Ws (g)	Wg (g)	Wss (g)	% gasolina en función del suelo seco
50.00	0.56	49.44	1.12
49.00	0.54	48.46	1.12
35.00	0.39	34.61	1.12
100.00	1.11	98.89	1.12

8.2 Gravedad específica

Se usaron los matraces ya calibrados para el cálculo de la gravedad específica en el suelo contaminado. Los ensayos 1, 2 y 3 se hicieron con el suelo sin secar y restando el porcentaje de gasolina al suelo ensayado, y los ensayos 4, 5, 6 y 7 se hicieron con el suelo contaminado secado al horno.

ENSAYO No. 1

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T_t	---	21.2
Masa matraz + agua + suelo	g	$M_{pws,t}$	---	721.81
Masa suelo seco	g	M_s	---	50.87
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	690.87
Gravedad específica a t °C	---	G_t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5522
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9997
GS a 20 °C	---	$G_{1@20^\circ C}$	$G_{1@20^\circ C} = (K * G_t)$	2.5516

ENSAYO No. 2

Matraz No.	---	---	---	9
Temperatura de ensayo	°C	T_t	---	21.2
Masa matraz + agua + suelo	g	$M_{pws,t}$	---	695.59
Masa suelo seco	g	M_s	---	51.26
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	664.56
Gravedad específica a t °C	---	G_t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5337
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9997
GS a 20 °C	---	$G_{1@20^\circ C}$	$G_{1@20^\circ C} = (K * G_t)$	2.5331

ENSAYO No. 3

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T_t	---	26.5
Masa matraz + agua + suelo	g	$M_{pws,t}$	---	721
Masa suelo seco	g	M_s	---	50.87
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	690.27
Gravedad específica a t °C	---	G_t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5264
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9984
GS a 20 °C	---	$G_{1@20^\circ C}$	$G_{1@20^\circ C} = (K * G_t)$	2.5225

ENSAYO No. 4

Matraz No.	---	---	---	9
Temperatura de ensayo	°C	T _t	---	27.5
Masa matraz + agua + suelo	g	M _{pws,t}	---	694.91
Masa suelo seco	g	M _s	---	51.26
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	663.80
Gravedad específica a t °C	---	G _t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5435
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9982
GS a 20 °C	---	G _{1@20 °C}	G _{1@20 °C} = (K * G _t)	2.5389

ENSAYO No. 5

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T _t	---	20.5
Masa matraz + agua + suelo	g	M _{pws,t}	---	721.43
Masa suelo seco	g	M _s	---	50.39
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	690.94
Gravedad específica a t °C	---	G _t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5317
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9999
GS a 20 °C	---	G _{1@20 °C}	G _{1@20 °C} = (K * G _t)	2.5314

ENSAYO No. 6

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T _t	---	26.5
Masa matraz + agua + suelo	g	M _{pws,t}	---	718.86
Masa suelo seco	g	M _s	---	47.226
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	690.27
Gravedad específica a t °C	---	G _t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5348
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	0.9984
GS a 20 °C	---	G _{1@20 °C}	G _{1@20 °C} = (K * G _t)	2.5308

ENSAYO No. 7

Matraz No.	---	---	---	3
Temperatura de ensayo	°C	T _t	---	19.9
Masa matraz + agua + suelo	g	M _{pws,t}	---	719.56
Masa suelo seco	g	M _s	---	47.226
Masa agua en el matraz a t °C	g	---	---	691.00
Gravedad específica a t °C	---	G _t	$G_t = \frac{M_s}{M_{pw,t} + M_s - M_{pws,t}}$	2.5295
Coefficiente de temperatura a t °C	---	K	---	1.0000
GS a 20 °C	---	G _{1@20 °C}	G _{1@20 °C} = (K * G _t)	2.5296

ENSAYO No. 1	
Gs =	2.552

ENSAYO No. 5	
Gs =	2.531

ENSAYO No. 3	
Gs =	2.533

ENSAYO No. 6	
Gs =	2.531

ENSAYO No. 3	
Gs =	2.523

ENSAYO No. 7	
Gs =	2.530

ENSAYO No. 4	
Gs =	2.539

PROMEDIO =	2.531
------------	-------

PROMEDIO =	2.537
------------	-------

PROMEDIO =	2.534
------------	-------

8.3 Límites de consistencia

LÍMITE LÍQUIDO

ENSAYE NO 1 (COPA CASAGRANDE)

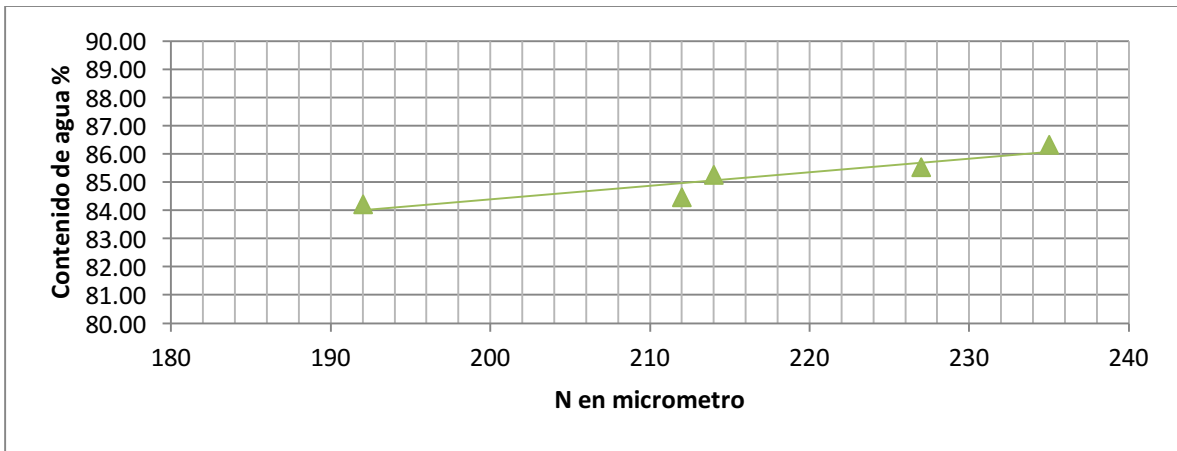
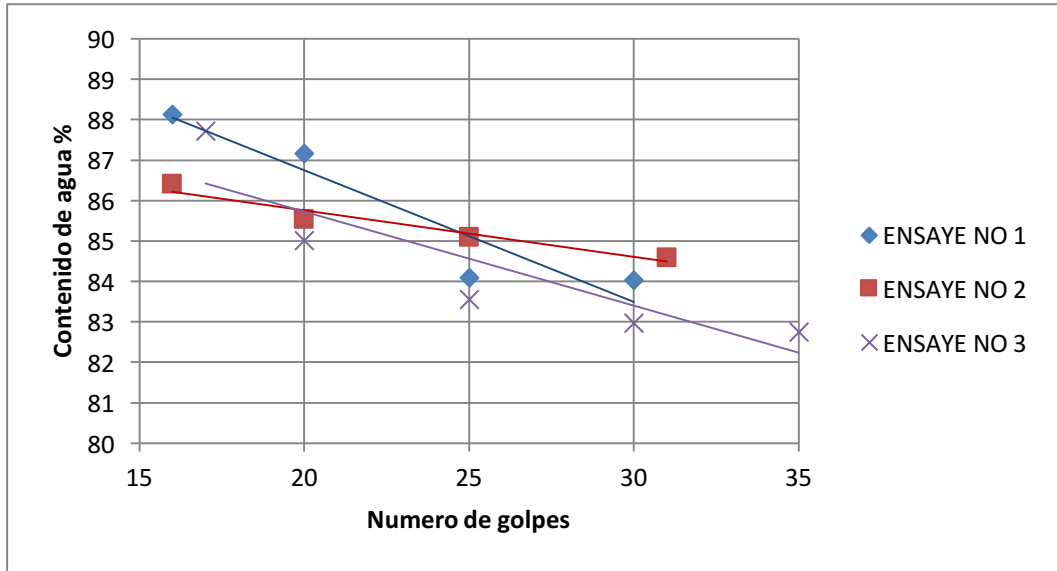
No golpes	Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%
30	49	50.17	38.16	12.01	24.36	13.8	84.02
25	X-2	57.64	42.36	15.28	24.19	18.17	84.09
20	MEE	55.72	40.43	15.29	22.89	17.54	87.17
16	M1006	50.35	36.99	13.36	21.83	15.16	88.13

ENSAYE NO 2 (COPA CASAGRANDE)

No golpes	Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%
31	1	19.501	14.5468	4.9542	8.6903	5.8565	84.59
25	*2'	19.6135	14.5162	5.0973	8.526	5.9902	85.09
20	5'	20.062	14.7156	5.3464	8.465	6.2506	85.53
16	R	21.905	15.7146	6.1904	8.55	7.1646	86.40

ENSAYE NO 3 (CONO INGLES)

N en micrómetro	Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%
192	27	13.594	8.9	4.694	3.325	5.575	84.20
212	7'	19.3152	14.379	4.9362	8.5341	5.8449	84.45
214	R'	18.022	13.6185	4.4035	8.4535	5.165	85.26
227	4C35	19.2425	14.2433	4.9992	8.3982	5.8451	85.53
235	6	17.607	13.4128	4.1942	8.5531	4.8597	86.31



LÍMITE PLÁSTICO

ENSAYE NO 1

Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%	w% promedio
8	40.73	36.73	4	26.81	9.92	40.32	39.59
14'	32.02	28.89	3.13	20.9	7.99	39.17	
M1006	31.76	28.96	2.8	21.83	7.13	39.27	

ENSAYE NO 2

Capsula No.	W _{cáp+suelo húm} (g)	W _{cáp+suelo seco} (g)	W _{agua} (g)	W _{cáp} (g)	W _{suelo seco} (g)	w%	w% promedio
58A	140.71	137.68	3.03	129.418	8.262	36.67	36.77
4P	130.94	127.84	3.1	119.433	8.407	36.87	

CONTRACCIÓN LINEAL (CL %)

ENSAYE NO 1

Long. Inicial (cm)	9.91
Long. Final (cm)	7.96
CL (%)	19.74

ENSAYE NO 2

Long. Inicial (cm)	10.13
Long. Final (cm)	7.89
CL (%)	22.08

ENSAYE NO 3

Long. Inicial (cm)	10.06
Long. Final (cm)	7.86
CL (%)	21.89

LÍMITE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA

ENSAYE NO 1

# cápsula	SN	W _{cáp}	17.09
W _{cáp} + W _{suelo húm} (g)	56.98	W _{cáp} + W _{suelo seco} (g)	40.33
W _{suelo húm} (g)	39.89	W _{suelo seco} (g)	23.24
Vol. Inicial (cm ³)	26.26	W _{fondo} (g)	94.01
W _{fondo + mercurio} (g)	277.39	W _{mercurio} (g)	183.38
Y _{mercurio} (g/cm ³)	13.58	Vol. final (cm ³)	13.50
Y _{agua} (g/cm ³)	1.00		

CV (%)	16.73
--------	-------

ENSAYE NO 2

# cápsula	roja	W _{cáp}	23.72
W _{cáp} + W _{suelo húm} (g)	78.03	W _{cáp} + W _{suelo seco} (g)	53.32
W _{suelo húm} (g)	54.31	W _{suelo seco} (g)	29.60
Vol. Inicial (cm ³)	37.25	W _{fondo} (g)	90.48
W _{fondo + mercurio} (g)	314.97	W _{mercurio} (g)	214.56
Y _{mercurio} (g/cm ³)	13.58	Vol. final (cm ³)	15.80
Y _{agua} (g/cm ³)	1.00		

CV (%)	11.05
--------	-------

ENSAYE NO 3

# cápsula	SN	W _{cáp}	18.58
W _{cáp} + W _{suelo húm} (g)	55.67	W _{cáp} + W _{suelo seco} (g)	39.12
W _{suelo húm} (g)	37.09	W _{suelo seco} (g)	20.54
Vol. Inicial (cm ³)	23.77	W _{fondo} (g)	86.34

W fondo + mercurio (g)	246.66	W mercurio (g)	160.32
Y mercurio (g/cm3)	13.58	Vol. final (cm3)	11.81
Y agua (g/cm3)	1.00		

CV (%)	12.37
--------	-------

	ENSAYE NO 1	ENSAYE NO 2	ENSAYE NO 3	PROMEDIO
LL=	84.01%	85.09%	84.30%	84.46%
LP=	39.59%	36.77%	---	38.18%
lp=	44.42%	48.32%	---	46.37%
CL=	19.74%	22.08%	21.89%	21.24%
CV=	16.73%	11.05%	12.37%	13.38%

Gráfica de plasticidad del USCS

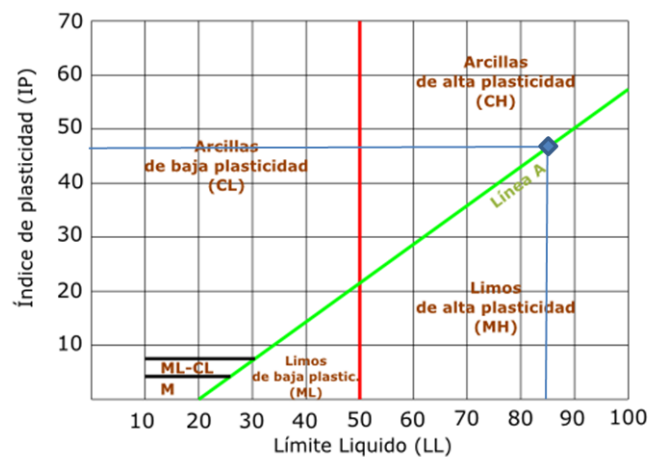


Tabla de control de humedades para el cálculo de los límites.

Vaso (11) (gr)	Suelo + vaso (gr)	Suelo (gr)	Humedad actual (%)	Humedad teorica (%)	Peso humedo (gr)	Nuevo Peso (gr)	Humedad calculada (gr)	Diferencia entre humedad calculada y teorica (%)
204.70	704.70	500.00	0.00	80.00	1104.70	627.52		
204.70	627.52	422.82	80.00	80.50	628.69	604.88	84.20	3.70
204.70	604.88	400.18	80.50	81.50	607.10	477.12	84.45	2.95
204.70	477.12	272.42	81.50	82.00	477.87	451.09	85.26	3.26
204.70	451.09	246.39	82.00	83.00	452.44	420	85.53	2.53
204.70	420.00	215.30	83.00	83.50	420.59	400	86.31	2.81

8.4 Análisis granulométrico

SUELO MAS FINO QUE 75 μm (malla No. 200)

MATERIAL ANTES DEL LAVADO

# cápsula	2	$W_{\text{cáp}}$	429.2 g
$W_{\text{cáp}} + W_{\text{suelo seco}}$	878.15 g		
$W_{\text{suelo seco}}$	448.95 g		

MATERIAL DESPUÉS DEL LAVADO

# cápsula	3v	$W_{\text{cáp}}$	24.91 g
$W_{\text{cáp}} + W_{\text{suelo seco}}$	32.81 g		
$W_{\text{suelo seco}}$	7.9 g		
% de material más fino que la malla No. 200			98.24 %

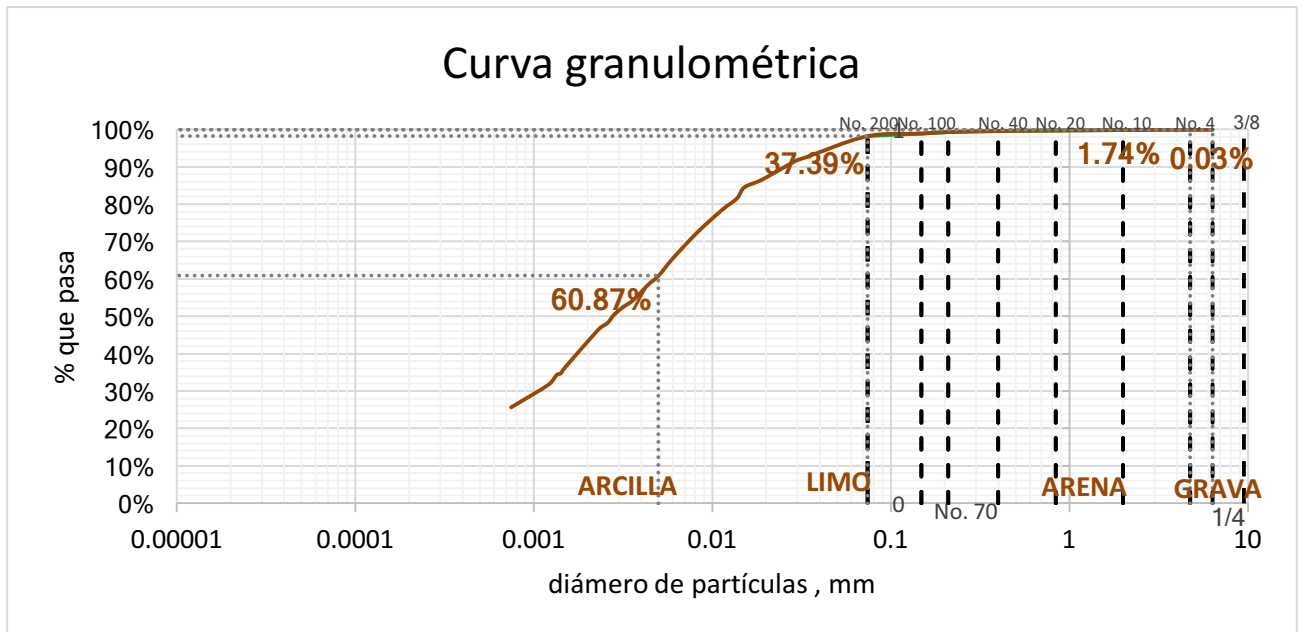
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Malla	Abertura	Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje que pasa
No.	mm	g	%	%
1/4 in	6.35	0	0.00	100.00
No. 4	4.750	0.15	0.03	99.97
Pasa No. 4	---	448.8	99.97	---
SUMA	---	448.95	---	---
No. 10	2.000	0.37	0.08	99.88
No. 20	0.840	0.61	0.14	99.75
No. 40	0.400	0.62	0.14	99.61
No. 60	0.250	1.27	0.28	99.33
No. 100	0.149	1.82	0.41	98.92
No. 200	0.074	3.11	0.69	98.23
Pasa No. 200	---	441.05	98.24	---
SUMA	---	449.00	100.01	---

PERDIDA	-0.05	g	-0.01	%
---------	-------	---	-------	---

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	
MASA TOTAL (g)	448.95
PASA No. 200 (g)	441.05
MASA ENSAYADA (g)	50
G _s =	2.531

FECHA	HORA	TIEMPO TRANS	LECTURA HIDRÓMETRO (SUELO), R	TEMPERATURA °C	LECTURA (CON DEFLOCULANTE)	LECTURA CORREGIDA	FACTO R _a	% SUELO EN SUSPENSIÓN	MASA SUELO EN SUSPENSIÓN g	L EFECTIVA	K VALOR	DIÁMETRO DE PARTICULA EN mm	% RELACIÓN AL TOTAL
20170824	13:56	1 min	51	21.5	5	46	1.02	94.27%	47.14	7.9	0.014602	0.0411	1.65%
	13:57	2 min	50	21.5	5	45	1.02	92.22%	46.11	8.1	0.014602	0.0294	1.18%
	14:00	5 min	48	21.5	5	43	1.02	88.12%	44.06	8.4	0.014602	0.0190	0.76%
	14:03	8 min	46	21.5	5	41	1.02	84.03%	42.01	8.8	0.014602	0.0153	0.61%
	14:05	10 min	44.5	21.5	5	39.5	1.02	80.95%	40.48	9.0	0.014602	0.0139	0.55%
	14:10	15 min	43	21.5	5	38	1.02	77.88%	38.94	9.3	0.014602	0.0115	0.46%
	14:25	30 min	40	21.5	5	35	1.02	71.73%	35.86	9.7	0.014602	0.0083	0.33%
	15:40	45 min	37.5	22	5	32.5	1.02	66.61%	33.30	10.2	0.0145147	0.0069	0.28%
	14:55	60 min	37	22	5	32	1.02	65.58%	32.79	10.2	0.0145147	0.0060	0.24%
	15:25	90 min	36	22	4.5	31.5	1.02	64.56%	32.28	10.4	0.0145147	0.0049	0.20%
	16:25	150 min	33.5	22	4.2	29.3	1.02	60.05%	30.02	10.8	0.0145147	0.0039	0.16%
	17:26	211 min	32	22	4	28	1.02	57.38%	28.69	11.1	0.0145147	0.0033	0.13%
	17:55	240 min	32	22	4.2	27.8	1.02	56.97%	28.49	11.1	0.0145147	0.0031	0.12%
	18:10	255 min	31.5	22	4.8	26.7	1.02	54.72%	27.36	11.1	0.0145147	0.0030	0.12%
	20:31	396 min	30	21	5	25	1.02	51.23%	25.62	11.4	0.0146899	0.0025	0.10%
20170825	10:04	1209 min	27	21.5	4.5	22.5	1.02	46.11%	23.06	11.9	0.014602	0.0014	0.06%
	12:34	1359 min	25.5	21	4	21.5	1.02	44.06%	22.03	12.1	0.0146899	0.0014	0.06%
	13:34	1419 min	25.5	21.2	4.2	21.3	1.02	43.65%	21.83	12.1	0.0146547	0.0014	0.05%
	13:58	1443 min	25	21.5	4.2	20.8	1.02	42.63%	21.31	12.2	0.014602	0.0013	0.05%
	14:22	1463 min	24	22.1	4.5	19.5	1.02	39.96%	19.98	12.4	0.0144973	0.0013	0.05%
20170828	11:19	5604 min	22	21	5	17	1.02	34.84%	17.42	12.7	0.0146899	0.0007	0.03%



8.5 Potencial de hidrógeno, pH.

Potencial de hidrógeno			
Fecha	Hora	Temperatura	pH
30 de Enero del 2018	12:21	16.2 °C	7.63
30 de Enero del 2018	13:21	16.2 °C	7.71
31 de Enero del 2018	16:04	16.6 °C	7.65
31 de Enero del 2018	16:27	15.9 °C	7.65
Promedio			7.66

8.6 Superficie específica.

Fecha	mL consumidos	N incrementos de 0.5 mL	Superficie específica (Se) m²/g
12 de Julio del 2018	23	46	563.00
12 de Julio del 2018	20	40	489.57
13 de Julio del 2018	21	42	514.05
13 de Julio del 2018	20	40	489.57
Promedio			514.05