



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE RETENCIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON
GASOLINA Y DIÉSEL**

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniero Civil

Presenta:
Laura Yessenia Cabello Suárez

Dirigido por:
Dra. María de la Luz Pérez Rea

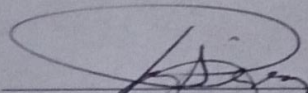
SINODALES

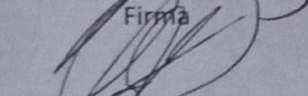
Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

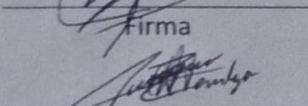
Dr. Omar Chávez Alegría
Secretario

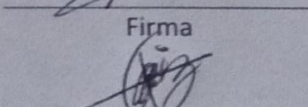
Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza
Vocal

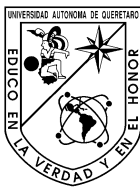
M. en C. José Roberto Galaviz González
Suplente


Firma


Firma


Firma


Firma



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil



ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE RETENCIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON GASOLINA Y DIÉSEL

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniero Civil

Presenta:
Laura Yessenia Cabello Suárez

Dirigido por:
Dra. María de la Luz Pérez Rea

SINODALES

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

Firma

Dr. Omar Chávez Alegría
Secretario

Firma

Dr. Christian Eduardo Hernández Mendoza
Vocal

Firma

M. en C. José Roberto Galaviz González
Suplente

Firma

El éxito de una persona, no se mide por sus triunfos,
si no por la capacidad de sobresalir ante los fracasos.

El saber y la razón hablan, la ignorancia y el terror gritan.
(Graf, Arthur)

DEDICATORIA

A mi madre, padre, amiga y guerrera
la Sra. Ma. Dolores Suárez García,
por ser el pilar fundamental en todo lo que soy,
en toda mi educación,
tanto, académica como de la vida,
por su incondicional apoyo,
y enseñanza a resistir y seguir adelante,
ante los golpes fuertes que la vida te da,
y que el mejor guerrero,
no es el que triunfa siempre,
sino el que vuelve sin miedo a la batalla.

A la memoria de mi padre,
el Sr. José Francisco Cabello Pichardo,
que aunque él,
ya no se encuentre con nosotros en este mundo,
será mi ángel que me cuida desde el cielo,
encontrándose siempre a mi lado en todo momento;
en mis triunfos y fracasos,
(1967-2000).

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la capacidad de soñar y permitirme hacer realidad cada uno de mis sueños, dándome inteligencia, fortaleza, decisión, y sobre todo una vida maravillosa rodeada de personas que me quieren y me estiman.

A mi familia: mi madre, abuelita y hermanas; por su apoyo incondicional, y a pesar de los golpes y obstáculos que la vida nos ha elegido, para que los enfrentemos con valentía y decisión, haciéndose mínimos cuando estamos unidas. A mis hermanas Andy y Mony que siempre me demuestran que como su hermana mayor, siempre seré su orgullo y su ejemplo a seguir, a pesar de nuestras diferencias en formas de pensar y opinar.

A Roberto Galaviz: por estar a mi lado en éste cierre de ciclo en mi vida, por su amor, apoyo, paciencia, comprensión, llenarme de su sabiduría y experiencia y sobre todo por darme una inmensa dotación de sonrisas.

A mis amigos y compañeros de la carrera: porque con su amistad, risas y realizando trabajo en equipo se pudo llevar una buena amistad y compañerismo durante y después de la estancia en la Licenciatura.

A Mireydi: por su conocimiento compartido, consejos, complicidades, apoyo moral y físico y por esas platicas profundas que nos llevaban a risas y en ocasiones a tristezas.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea: por ser mi guía, maestra, consejera, ya que con su apoyo y su conocimiento fue posible terminar este proyecto, además por darme la oportunidad y confianza de trabajar bajo su dirección.

A mis profesores de la carrera, por sus enseñanzas, experiencias y sabiduría ya que sin su ayuda no sería la gran profesionalista que me he convertido.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por darme la oportunidad de forjarme como profesionalista en esta casa de estudios.

Desde hace algunos años se han publicado numerosos trabajos que han hecho aportaciones sobre el flujo de contaminantes en la zona vadosa desde el punto de vista hidráulico e hidroquímico, enfocados básicamente al transporte de lixiviados que pueden contaminar los acuíferos. Un número mucho menor se ha referido al flujo de hidrocarburos totales y sus derivados. El flujo en suelos no saturados está intrínsecamente ligado a potenciales de adsorción (succión) que dependen de la naturaleza mineralógica del suelo y de la composición química del agua. Estos potenciales se ven además afectados por el tipo de contaminante, resultando en variaciones de la retención del mismo y en su distribución espacial dentro de la masa del suelo. En este aspecto, las curvas de retención (curvas características) tienen un papel importante en los modelos de flujo a través del suelo no saturado. El conocimiento de cómo estas curvas resultan alteradas con la presencia de estos contaminantes resulta relevante al realizar modelos de difusión de los mismos dentro de la matriz porosa no saturada del suelo con el objeto de evaluar los avances de la pluma contaminante.

Para evaluar el impacto del contaminante en el suelo, se describe el proceso de laboratorio para determinar los valores de succión de probetas de suelo arcilloso contaminado con gasolina y diésel mediante la técnica del papel filtro, con el fin de establecer la relación entre la succión y el contaminante (Curva de Retención Gasolina-Suelo, SGRC y Curva de Retención Diésel-Suelo, SDRC). Los resultados muestran las variaciones de los valores de succión provocados por la presencia del contaminante con diferentes valores del grado de saturación. Además, se presenta una comparativa entre la Curva de Retención Agua-Suelo (SWRC), la Curva de Retención Gasolina-Suelo (SGRC) y la Curva de Retención Diésel-Suelo (SDRC).

Palabras claves: succión, Curvas de Retención, flujo de contaminantes, suelo no saturado.

SUMMARY

Over the years there have been numerous studies that have made contributions to the flow of contaminants in the vadose zone from the point of view of hydraulic and hydrochemical engineering basically focused on the transport of leachate that can contaminate the aquifers. A much smaller number has referred to the total flow of hydrocarbons and their derivatives. The flow in unsaturated soils is intrinsically linked to potential adsorptions (suction) that depend on the nature of the soil mineralogical composition as well as the chemical composition of water. These potentials are also affected by the type of contaminant resulting in variations in its retention and spatial distribution inside the soil mass. In this aspect, the retention curves (characteristic curves) have an important role in the flow patterns through unsaturated soil. The knowledge of how these curves are altered by the presence of these contaminants is relevant to model their dissemination inside the unsaturated porous soil matrix in order to assess the progress of the pollutant plume.

It was described the laboratory process to determine the suction values in clay soil specimens contaminated with gasoline and diesel by the technique of filter paper, to evaluate the impact of the contaminant in the soil and establish the relationship between the suction and the contaminant (Soil Gasoline Retention Curve, SGRC and Soil Diesel Retention Curve, SDRC). Results show the variations of the values of suction caused by the addition of the contaminant by raising the degree of saturation. Also, a comparison between the Soil Water Retention Curve (SWRC), the Soil Gasoline Retention Curve (SGRC) and the Soil Diesel Retention Curve (SDRC) is presented.

Keywords: suction, Retention Curves, flow of contaminants, unsaturated soil.

Contenido

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
SUMMARY.....	iv
ÍNDICE GENERAL	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Antecedentes.....	11
1.2. Planteamiento del problema	15
1.3. Justificación.....	16
1.4. Hipótesis.....	17
1.5. Objetivos	17
1.5.1. Objetivo General.....	17
1.5.2. Objetivos Particulares.....	18
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	19
2.1. Suelo	20
2.2. Importancia del suelo.....	20
2.3. Suelo expansivo	21
2.4. Método de la actividad.....	23
2.5. Identificación mineralógica.....	24
2.6. Succión.....	24
2.6.1. Componentes de la succión.....	27
2.7. Curvas de Retención	29
2.7.1. Fenómeno de Histéresis.....	33
2.8. Modelo empírico de Van Genuchten.....	34
2.9. Suelo contaminado.....	35
2.9.1. Contaminación.....	35
2.9.2. Contaminación del suelo	35
2.9.3. Efectos y riesgos relacionados con los contaminantes	36
2.10. Importancia del estudio de los suelos contaminados	37
2.11. Características de los hidrocarburos.....	38
2.12. Petróleo.....	40

2.12.1. Gasolina	41
2.12.2. Diésel	41
2.13. Problemática a causa de los hidrocarburos en México	42
2.14. Hidrocarburos en el suelo	43
2.14.1. Propiedades mecánicas de un suelo con presencia de hidrocarburos	44
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	46
3.1. Localización del suelo en estudio	48
3.2. Muestreo	48
3.3. Caracterización del suelo.....	49
3.3.1. Determinación del Contenido de Agua (ω)	49
3.3.2. Determinación del Peso Específico de la masa de suelo (γ_m).....	49
3.3.3. Determinación del Peso Específico relativo de los sólidos del suelo (S_s)....	50
3.3.4. Análisis granulométrico vía seca (por mallas)	50
3.3.5. Análisis granulométrico vía húmeda (por hidrómetro)	51
3.3.6. Límites de Consistencia (Atterberg)	51
3.3.6.1. Limite líquido (LL)	51
3.3.6.2. Limite plástico (LP)	53
3.3.6.3. Contracción Lineal y Límite de Contracción.....	53
3.4. Medición de la Succión.....	54
3.4.1. Curva de Retención del Agua-Suelo (SWRC).....	57
3.4.2. Curva de Retención del Gasolina-Suelo (SGRC).....	57
3.4.3. Curva de Retención del Diésel-Suelo (SDRC)	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
4.1. Caracterización Geotécnica	64
4.1.1. Límites de consistencia del suelo contaminado con gasolina	65
4.1.2. Límites de consistencia del suelo contaminado con diésel	65
4.2. Curva de Retención Agua-Suelo.....	67
4.3. Curva de Retención Gasolina-Suelo	68
4.4. Curva de Retención Diésel-Suelo	70
4.5. Comparación de las Curvas de Retención del Suelo	71
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXO A. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	83
A.1. Densidad Relativa de los Sólidos.....	83
A.2. Peso Específico de la Masa de Suelo (γ_m).....	84
A.3. Relaciones Volumétricas y Gravimétricas	84

A.4. Granulometría vía mallas (Curva Granulométrica)	85
A.5. Granulometría vía Hidrómetro.....	86
A.6. Límites de Consistencia Atterberg.....	86
A.6.1. Suelo natural	87
A.6.2. Suelo contaminado con Diésel.	88
ANEXO B. CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO	90
B.1. Curva de Retención Agua- Suelo 1.....	90
B.2. Curva de Retención Agua- Suelo 2.....	94
B.3. Curva de Retención Agua- Suelo 3.....	98
B.4. Datos promedios para la construcción de la Curva Característica.....	102
ANEXO C. CURVAS DE RETENCIÓN GASOLINA-SUELO	103
C.1. Curva de Retención Gasolina- Suelo 1.....	103
C.2. Curva de Retención Gasolina- Suelo 2.....	105
C.3. Datos promedios para la construcción de la Curva Característica.	107
ANEXO D. CURVAS DE RETENCIÓN DIÉSEL-SUELO	108
D.1. Curva de Retención Diésel- Suelo.....	108
D.2. Repeticiones Humedecimiento.	112
D.3. Datos promedios para la construcción de la Curva Característica.	113

Figura	Página
2-1. Esquema representativo del mineral montmorillonita (Ayala, 2008).	22
2-2. Grieta producida por un suelo expansivo (Roland, 2015).	23
2-3. Humedad relativa contra succión total (Fredlund & Rahardjo, 1993).	26
2-4. Agua en un suelo parcialmente saturado, sujeta a la capilaridad y a la adsorción (Lee & Wray, 1992).	28
2-5. Succión total y sus componentes: succión mátrica y osmótica (Fredlund & Rahardjo, 1993).	29
2-6. SWRC idealizada, con las curvas principales de humedecimiento–secado, Mostrando el fenómeno de histéresis (Han-Chen, et al., 2005).	31
2-7. Curvas características de succión, representativas de arenas, limos y arcillas.	32
2-8. Movimiento de la interfaz aire – agua (Wheeler, et al., 2003).	34
2-9. Variación de los límites de consistencia a través del tiempo (Nazir, 2011).	45
3-1. Localización geográfica del sitio del suelo a estudiar (Googlemaps, 2015).	48
3-2. Homogenización del material saturado para ser vertido en la Copa de Casagrande.	52
3-3. Colocación del material saturado en la Copa de Casagrande.	52
3-4. Determinación de la cantidad máxima de diésel retenida por el espécimen.	60
4-1. Suelo contaminado con Gasolina.	65
4-2. Determinación del límite de contracción con suelo contaminado con diésel.	66
4-3. Curva de Retención de Agua- Suelo (succión vs grado de saturación).	68
4-4. Curva de Retención de Gasolina- Suelo (succión vs grado de saturación).	69
4-5. Curva de Retención de Diésel- Suelo (succión vs grado de saturación).	70
4-6. Comparativa de Curvas de Retención del Suelo.	72
4-7. Comparativa de Curvas de Retención Diésel-Suelo.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2-1. Actividad de diferentes minerales.	23
2-2. Puntos de ebullición (Burns, 2003).	41
2-3. Parámetros que influyen en el transporte de sedimentos (Ortínez, et al., 2003).	44
3-1. Resumen de pruebas de laboratorio realizadas.	61
4-1. Caracterización Geotécnica del fraccionamiento Santa Fe, Querétaro.	64

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Desde hace algunos años se han publicado numerosos trabajos que han hecho aportaciones sobre el flujo de contaminantes en la zona vadosa desde el punto de vista hidráulico e hidroquímico. El flujo en suelos no saturados está intrínsecamente ligado a potenciales de adsorción (succión) que dependen de las propiedades (Lo & Hu, 2004); (Romero-Freire, *et al.*, 2015) el contenido de materia orgánica (Hayden, *et al.*, 1997); (Li, 2006); (Romero-Freire, *et al.*, 2015) y la naturaleza mineralógica del suelo, además de la composición química y cantidad de agua adsorbida contenida en el suelo (Hayden, *et al.*, 1997); (Lo & Hu, 2004). Además, éstos potenciales se ven afectados por el tipo de contaminante resultando en variaciones de la retención del mismo y en su distribución espacial dentro de la masa del suelo (Kessler & Rubin, 1987); (Li, 2006). En este aspecto, las curvas de retención tienen un papel importante en los modelos de flujo a través del suelo no saturado. El conocimiento de cómo se alteran estas curvas con la presencia de estos contaminantes resulta relevante al realizar modelos de difusión que ayuden a predecir la migración del contaminante dentro de la matriz porosa no saturada del suelo (Kessler & Rubin, 1987).

Debido a lo anterior, es importante canalizar nuestros esfuerzos en el desarrollo de investigaciones y modelos que ayuden a comprender y predecir el comportamiento del flujo de contaminantes derivados del petróleo a través del suelo, ya que éste está expuesto a una inminente contaminación, porque dichos productos son usados como combustibles de alta demanda (Hoag & Marley, 1986).

Ellis & Adams (1960) encontraron que los suelos contaminados con gas natural o crudo mostraron incrementos en materia orgánica, carbono total y nitrógeno comparado con suelos en estado natural. Plice (1948) encontró grandes incrementos en el contenido de materia orgánica en suelos que se han contaminado con crudo y también encontró que los suelos contaminados con gas natural tienen pH alrededor del punto neutral.

Elías Munguía y Martínez (SEMARNAT, 1996), concluyeron que las propiedades físicas del suelo más afectadas por derrames de hidrocarburos son:

- La estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados.
- Aumento de la retención del agua en la capa superficial.
- El potencial hídrico.

Las propiedades químicas del suelo más afectadas por un derrame de hidrocarburos son:

- Aumento de carbono orgánico, ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable.
- Disminución del pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos.
- Aumento del manganeso y hierro intercambiable.
- Aumento del fósforo disponible (SEMARNAT, 1996).

Los efectos tóxicos de los hidrocarburos en el ambiente dependerán de:

- La cantidad y composición del petróleo.
- La frecuencia y tiempo de exposición.
- El estado físico del derrame.
- Las características del sitio donde sucedió el derrame.
- Variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno.
- El uso de dispersantes químicos (está restringido su uso).
- La sensibilidad de la biota específica del ecosistema impactado (SEMARNAT, 1996).

Por otra parte, cuando se realiza un estudio de caracterización de un sitio contaminado con hidrocarburos, se determinan diversos parámetros físicos y químicos, sin considerar que dicha contaminación haya afectado a la zona circundante, de tal manera que el nivel de contaminación de éste se considera no perjudicial. Sin embargo, los hidrocarburos (gasolina y diésel) producen efectos en

las propiedades de la textura, es decir, que se incrementa el contenido de arenas y arcillas, disminuyendo el contenido de limos. Estas variaciones dependen del tipo y concentración de dichos contaminantes (Martínez & López, 2001).

Martínez & López (2001) obtuvieron la capacidad de intercambio catiónico para tres muestras de suelo, cada una con diferente hidrocarburo, siendo éstos diésel, gasolina y combustóleo. Ellos observaron que existe una variación en los valores de la capacidad de intercambio catiónico; sin embargo, la cual aumenta o disminuye independientemente de la concentración y tipo de hidrocarburo añadido por lo que concluyeron que la tendencia es indefinida. Estas variaciones están relacionadas con el efecto de la adsorción de los hidrocarburos en la superficie de las partículas minerales del suelo interfiriendo en los sitios de intercambio de cationes (Karimi-Lotfad, *et al.*, 1996) y por las interacciones electrostáticas (Yong, *et al.*, 1994); (Pignatello & Xing, 1996).

De acuerdo con la información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería “Lázaro Cárdenas” y el Pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México (Veracruz y Tabasco). En el informe anual de PEMEX de 1999 se estableció que el derrame de hidrocarburos representó el 0.3% de las emisiones y descargas totales. El 56% de este volumen fue consecuencia de los 93 derrames ocurridos en instalaciones de refinación de PEMEX (PR). El volumen restante se debió a los 763 derrames en instalaciones de PEMEX Exploración y Producción (PEP). En términos de hidrocarburos líquidos transportados por ductos en tierra, PEP derramó 14.3 barriles por cada millón de barriles transportados mientras que PR derramó 17.1 (Ortínez, *et al.*, 2003).

Smith, *et al.* (2003) realizaron una investigación usando organobentonitas para forrar tanques subterráneos de almacenamiento de gasolina para reducir el riesgo de contaminación del subsuelo. Se realizaron una serie de mediciones de la permeabilidad en dos tipos de organobentonita: benciltrietilamonio-bentonita y hexadeciltrimetilamonio bentonita. El agua y la gasolina, se usaron como los

líquidos penetrantes. Los resultados de estas mediciones indicaron que la permeabilidad de la organobentonita disminuye de uno a dos órdenes de magnitud cuando el líquido penetrante se cambia de agua a gasolina.

Torres & Esparza (2010) discutieron los criterios de selección de puntos y equipo de muestreo basándose en las características físicas de sitios contaminados con hidrocarburos. Generando un modelo conceptual de dispersión mediante el software ModFlow; destacando la importancia del Ingeniero Geotecnista en la planeación de los muestreos ambientales en sitios contaminados.

La aparición de hidrocarburos en el suelo definitivamente degrada su comportamiento en términos de propiedades de ingeniería (Rahman, *et al.*, 2011). La saturación del suelo por los fluidos que se caracterizan por propiedades físico-químicas diferentes a las del agua tienen un efecto de deterioro sobre los parámetros mecánicos y la filtración (Nazir, 2011). En especial los suelos arcillosos pueden reaccionar ante la presencia de un fluido diferente al agua, ya que contienen minerales químicamente activos que pueden interactuar de forma diferente con el fluido intersticial (Rahman, *et al.*, 2011).

En el Instituto de Ingeniería y de Geofísica de la UNAM se realizaron dos metodologías para caracterizar un sitio contaminado con hidrocarburos: método directo (muestreo) y método indirecto (tomografía eléctrica 2D y 3D). En el cual se concluye que la contaminación es puntual en algunas áreas. No se aprecia una migración del contaminante a mayores profundidades de 3 m. Se muestra que la técnica del método indirecto es de gran utilidad para proponer puntos de muestreo directo que identifiquen la presencia del contaminante y la profundidad (Acebedo, 2012).

Diversos autores realizaron estudios sobre el efecto del contenido de agua en el suelo sobre el destino de contaminantes liberados han demostrado que el contenido de agua del suelo, puede tener efectos en la absorción y el transporte de contaminantes orgánicos en la zona vadosa estos trabajos pueden ser

revisados en Acher *et al.* (1989), John-son & Perrott (1991), Ong & Lion (1991), Serrano & Gallego, (2006), Site (2001), Smith *et al.* (1990), Steinberg & Kreamer (1993). Estos estudios determinaron que el aumento en el contenido de agua del suelo podría reducir el área superficial disponible en el suelo rellenando algunos de sus poros. Dado que el agua puede reducir sustancialmente las actividades superficiales de los compuestos inorgánicos mediante que el aumento del contenido de agua de un suelo también podría disminuir la capacidad de sorción de la materia orgánica (Ugwoha & Andresen, 2014).

Diversos estudios relacionados con el uso de suelos contaminados con algún derivado del petróleo han sido llevados a cabo, con el fin de evaluar el impacto que generan dichos contaminantes en el comportamiento hidro-mecánico del suelo. En la Universidad Autónoma de Querétaro se presentó un análisis de la capacidad de carga de un suelo arcilloso contaminado con combustible diésel. Pruebas triaxiales drenadas consolidadas se realizaron en especímenes contaminados en el laboratorio con 10, 20 y 30% de diésel y curvas características para cada caso fueron determinadas. Las variaciones de los parámetros mecánicos para cada incremento de contaminante, los cuales se vieron reflejados en el valor de la capacidad de carga así como en la variación en el valor de la succión (Antonio, 2014).

Este trabajo de investigación presenta la medición de curvas de retención de un suelo expansivo en estado natural y contaminado con gasolina y diésel. A su vez, se muestra una comparativa entre dichas curvas, con el fin de evaluar el impacto en el fenómeno de histéresis y la capacidad de retención del suelo, debido a la presencia de gasolina y diésel en la estructura interna del mismo.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad no se tienen curvas características de un suelo con un contaminante en específico, por lo que esto es una parte importante para la aplicación práctica en cuanto a estudios de flujo o prototipos.

Durante el estudio se utilizaron dos tipos de contaminante (gasolina y diésel) para evaluar la existencia de algún cambio significativo en las propiedades del material cuando se encuentra contaminado. El suelo estudiado en este proyecto fue una arcilla extraída del fraccionamiento Santa Fe, Santiago de Querétaro, México. Así mismo se determinaron las curvas de retención para conocer las afectaciones en los valores de succión y humedad iniciales en condición natural y contaminada del suelo.

1.3. Justificación

Los suelos aledaños a las instalaciones petroleras en México tienen riesgos de ser afectados por fugas o derrames de diversos hidrocarburos o sus derivados. No obstante que el marco legal ambiental establece, a través de las normas oficiales mexicanas, los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y los lineamientos para la remediación, los parámetros geoquímicos utilizados no garantizan la recuperación de las condiciones originales del suelo.

La importancia de evaluar un suelo al contaminarse con hidrocarburos, se deben de prever las causas y consecuencias que podrían originarse si su microestructura y propiedades físico-químicas se alteran, ya que estas definen la capacidad de carga y la estabilidad del suelo (Pons-Jiménez, *et al.*, 2011).

Si ocurre un derrame en una zona donde existe una edificación y las propiedades mecánicas del suelo se ven afectadas pueden ocasionar pérdidas desde económicas hasta, en un caso extremo, pérdidas humanas por la falta de estabilidad en la estructura; de conocerse la reacción que tendrá el suelo ante un contaminante se pueden tomar medidas de precaución y soluciones.

Una vez que ha ocurrido un derrame o fuga de hidrocarburos en el suelo, se presentan fenómenos (capilaridad y gravedad principalmente), que hacen que los hidrocarburos migren hacia las aguas subterráneas, por lo tanto es necesario entender la forma del transporte.

El suelo y el agua son dos recursos fundamentales del ambiente agrícola. Con los avances en las nuevas tecnologías agrícolas, grandes cantidades de agua y productos químicos son aplicados al suelo cada año. Este uso excesivo, ha puesto en peligro nuestros recursos, en adición existe un incidente de contaminación de los acuíferos y las aguas superficiales, erosión, etc. En respuesta a estos problemas ambientales ha habido un incremento en los esfuerzos por desarrollar prácticas de manejo agrícola sostenibles, que integren los elementos correspondientes al continuo agua-suelo-planta-atmósfera.

Por ello, es necesario conocer las propiedades hidráulicas del suelo, curvas de retención de agua-suelo (SWRC por sus siglas en inglés) y la función de conductividad hidráulica (HCF por sus siglas en inglés) en función de la humedad y el empleo de modelos hidrológicos. La ventaja del uso de modelos analíticos en los estudios de agua en el suelo incluye una fácil comparación de propiedades hidráulicas de los suelos, interpolación de saldos faltantes e información adecuada para la aplicación de los modelos de flujo en la zona no saturada.

1.4. Hipótesis

La presencia de gasolina o diésel modifica las propiedades de plasticidad y la capacidad de retención del fluido en el suelo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo del comportamiento de las curvas de retención de un suelo tanto en estado natural como en estado contaminado con distintos tipos de hidrocarburos, así como analizar el comportamiento de las propiedades índice del suelo ante la presencia de estos hidrocarburos.

1.5.2. Objetivos Particulares

1. Encontrar la relación entre las curvas de retención de un suelo en estado natural y contaminado con dos hidrocarburos (gasolina y diésel).
2. Evaluar el impacto de los contaminantes (gasolina y diésel) en la capacidad de retención de un suelo y en las propiedades de plasticidad.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Suelo

El suelo se ha definido, en términos de ingeniería, como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y con cimientos estructurales (Braja, 2001).

Es suelo es producido como un resultado de la influencia del agua y aire sobre la corteza terrestre, estos agentes tienen dos mecanismos de ataque: desintegración mecánica y descomposición química. La desintegración mecánica, es decir, la fractura y rompimiento de varios tipos de roca, puede generarse por cambios periódicos de temperatura, por la acción de la congelación del agua en las grietas de las rocas o efectos de microorganismos y plantas. Sea cualquiera de los anteriores el caso, dan lugar generalmente a arenas y limos. En cambio, la descomposición química se refiere a la alteración mineralógica o química de la roca. La oxidación, hidratación y carbonatación son las reacciones mediante las cuales el agua ataca a la roca generando suelo arcilloso (Antonio, 2014).

El suelo se clasifica según su textura: fina o gruesa, y por su estructura: floculada, agregada o dispersa, lo que define su porosidad que permite una mayor o menor circulación del agua, y por lo tanto la existencia de especies vegetales que necesitan concentraciones más o menos elevadas de agua o de gases.

2.2. Importancia del suelo

La importancia del suelo radica en que es un elemento natural dinámico y vivo que constituye la interfaz entre la atmósfera, la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de materia y energía (Ortiz, *et al.*, 2007).

El suelo proporciona los nutrientes, el agua y el soporte físico necesarios para el crecimiento vegetal y la producción de biomasa en general, desempeñando un papel fundamental como fuente de alimentación para los seres

vivos. Es un componente esencial del ciclo hidrológico, actuando como elementos distribuidos de las aguas superficiales y contribuyendo al almacenaje y recarga de las aguas subterráneas (Ortiz, *et al.*, 2007).

El suelo, a través de su poder de amortiguación o degradación natural del contaminante, filtra, almacena, degrada, neutraliza e inmoviliza sustancias orgánicas e inorgánicas tóxicas, impidiendo que alcancen las aguas subterráneas y el aire o que entren en la cadena alimenticia. Además, es el hábitat natural biológico de muchos organismos de todo tipo y constituye un elemento de reserva genética, además de desarrollar un importante papel como fuente de materias primas (Ortiz, *et al.*, 2007).

Sirve de plataforma para el desarrollo de las actividades humanas como soporte de la estructura socioeconómica y forma parte del paisaje y del patrimonio cultural. El suelo es un elemento frágil del medio ambiente, un recurso natural no renovable puesto que su velocidad de formación y regeneración es muy lenta mientras que los procesos que contribuyen a su degradación, deterioro y destrucción son muchos más rápidos. Por ello, es de suma importancia concienciar a la opinión pública sobre este aspecto y establecer medidas ambientales y políticas de actuación que garanticen la protección y conservación de los suelos (Ortiz, *et al.*, 2007).

2.3. Suelo expansivo

Un suelo expansivo es un suelo arcilloso que tiene la capacidad de cambiar su volumen cuando el contenido de agua del suelo sufre un incremento o decremento. El suelo se contraerá cuando su contenido de agua disminuye, en caso contrario, el suelo se expandirá cuando su contenido de agua se incremente.

El mineral de arcilla responsable de los daños debido a su expansión es la que se conoce como montmorillonita. Cuando se agrega a esas arcillas, las moléculas de agua son adsorbidas hacia los espacios interplanares existentes entre las placas de arcilla. Cuanto más agua sea absorbida, dicho espacio

interplanar será forzado a ser mayor, esto conduce a un incremento en la presión del suelo a un incremento de volumen del mismo.

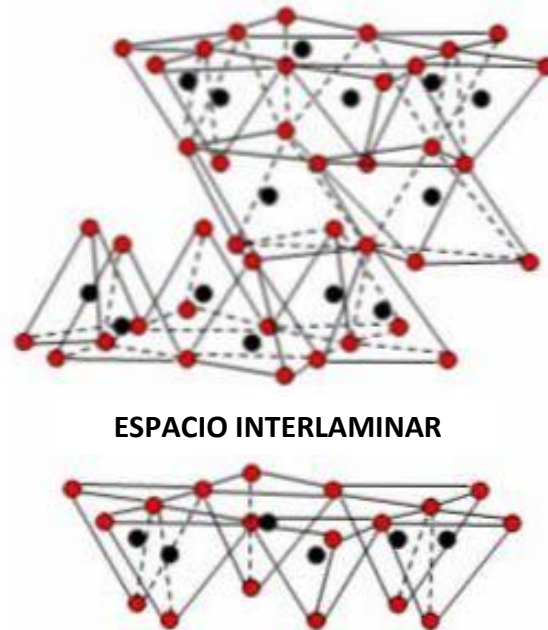


Figura 2-1. Esquema representativo del mineral montmorillonita (Ayala, 2008).

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. La partícula atrae a los iones positivos del agua (H^+) y a cationes de Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} , Fe^{+++} , entre otros. Esto conduce a que la partícula de suelo se rodea por una capa de moléculas de agua orientadas y ligadas comúnmente llamada agua adsorbida.

Las arcillas expansivas llegan a ser muy pegajosas cuando están húmedas y se caracterizan por grietas cuando estas se secan, provocando daños a las estructuras ligeras forma escalonada (ver Figura 2-2). Estas grietas, son las señales para identificar que se trata de un suelo expansivo.



Figura 2-2. Grieta producida por un suelo expansivo (Roland, 2015).

2.4. Método de la actividad

El método de la actividad fue propuesto por Seed, Woodward y Lundgren (1962). La actividad se define como la relación entre el Índice Plasticidad y el porcentaje de partículas menores de 2 micras.

$$Actividad = \frac{\text{Índice de Plasticidad}}{(\% < 0.002mm) - 10} \quad (2-1)$$

También dependiendo del mineral que se compone la arcilla, se puede conocer qué tanta actividad presente el suelo expansivo (ver Tabla 2-1.).

Tabla 2-1. Actividad de diferentes minerales.

MINERAL	ACTIVIDAD
Caolinita	0.33 a 0.46
Ilita	0.9
Montmorillonita (Ca)	1.5
Montmorillonita (Na)	7.2

El comportamiento expansivo del suelo puede determinarse en función de la actividad de la arcilla (A) en la forma siguiente (Crespo, 1979):

$A < 0.75$ Arcilla relativamente inactiva,

$0.75 < A < 1.5$ Arcilla con actividad normal,

$A > 1.5$ Arcillas progresivamente más activas,

2.5. Identificación mineralógica

Existen varios procedimientos para identificar los minerales que constituyen una arcilla; Difracción de Rayos X, Balance Térmico de las Arcillas, Análisis Químico, Microscopio Eléctrico de Barrido y Potencial de Hidrógeno (pH).

Los Rayos X se difractan a su paso a través de una muestra de arcilla y cada trayectoria de difracción es una imagen de distintos planos atómicos; el conjunto de trayectorias retraza la estructura interna de la arcilla.

Análisis químico, algunas arcillas se convierten entre otros compuestos químicos después de un proceso de secado de altas temperaturas.

El Microscopio Eléctrico de Barrido, permite la observación directa de todo tipo de superficies, así como extender el rango de resolución de las imágenes hasta la escala nanométrica. Proporciona información sobre la topografía y la estructura cristalográfica de todo tipo de materiales estructurales (Ipohorski, 2011).

Proporciona datos en cuanto a forma y tamaño de las partículas mineralógicas. El método más usado en día de hoy, es el de Rayos X, el cual proporciona información más segura y general en comparación con los otros métodos antes mencionados.

2.6. Succión

La importancia de la succión para explicar el comportamiento mecánico de suelos no saturados desde el punto de vista ingenieril se introdujo en el

Laboratorio de Investigación de Caminos en Inglaterra (Croney & Coleman, 1948); (Croney, *et al.*, 1950).

Cuando se habla de succión, generalmente se hace referencia a la energía libre del agua del suelo (Edlefsen & Anderson, 1943), la cual puede medirse en términos de presión parcial del vapor del agua del suelo (Richards, 1965). La relación termodinámica entre la succión y la presión parcial del vapor de agua en los poros del suelo puede expresarse como:

$$\psi = \frac{RT}{v_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad (2-2)$$

Dónde:

Ψ = Succión o succión total (kPa)

R=Constante universal de los gases [8.31432 J/ (mol K)]

T= Temperatura absoluta [T=(273.16 + t° (K)]

t°= Temperatura (°C)

v_{w0} = Volumen específico del agua o inverso de la densidad del agua [(1/ ρ_w) (m³/kg)]

ρ_w = Densidad del agua (998 kg/m³ a t°=20°C)

ω_v = Masa molecular del vapor de agua (18.016 kg/kmol)

u_v = Presión parcial del vapor de agua (kPa)

u_{v0} = Presión de saturación del vapor de agua sobre una superficie horizontal de agua pura a la misma temperatura (kPa)

La ecuación (2-2) muestra que el estado de referencia para cuantificar las componentes de succión es la presión de vapor sobre una superficie horizontal de agua pura (agua sin sal u otras impurezas). El término $\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right)$ es la humedad relativa, RH (%). Si se elige 20°C como temperatura de referencia, la constante de la ecuación (2-2) es igual a 135 022 kPa, de tal forma que la ecuación puede

expresarse como una relación fija entre succión y presión vapor de la siguiente forma:

$$\psi = -135022 \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad (2-3)$$

La Figura 2-3 muestra curvas obtenidas con la ecuación (2-2) para tres temperaturas. La succión es cero cuando la humedad relativa es 100% y cuando es menor a este valor indica la presencia de succión. La Figura 2-3 también muestra que la succión puede ser extremadamente alta. Para el caso de una humedad relativa de 94.24% y 20°C se tiene una succión de 8 000 kPa; sin embargo, a pesar de la existencia de valores tan altos, los que se encuentran en ingeniería geotécnica corresponden a humedades relativas altas (Fredlund & Rahardjo, 1993).

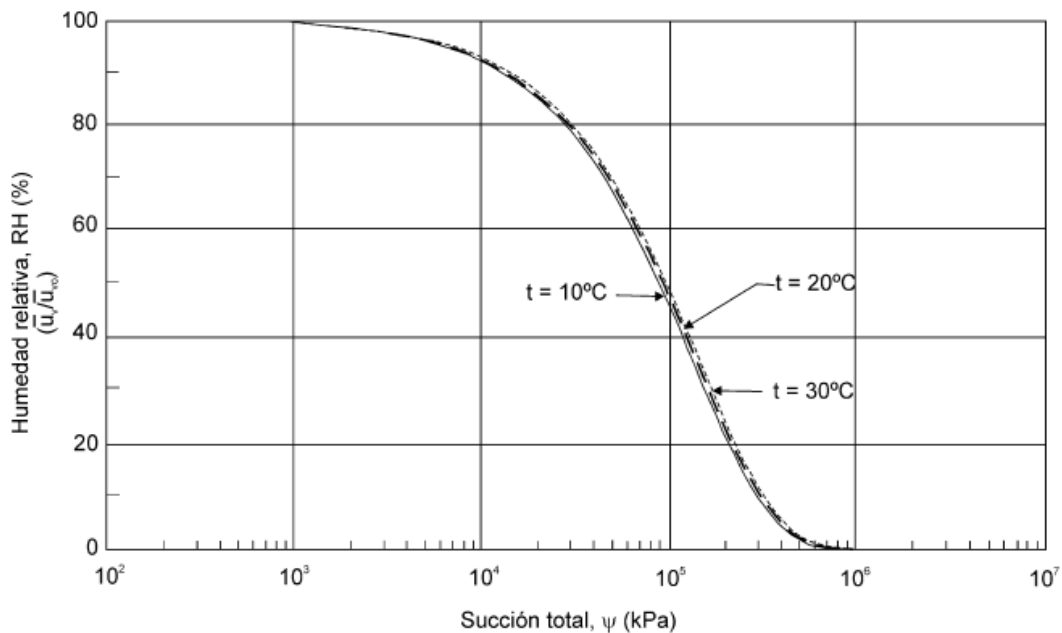


Figura 2-3. Succión total contra Humedad relativa (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El término “Succión del suelo”, fue usado por Schofield (1935) para representar la “deficiencia de presión” en el agua de poros de algunos suelos que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba, sometido a la presión atmosférica. El término Succión o potencial de agua designa la integrante del estado de esfuerzo para aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo.

De acuerdo con (Lee & Wray, 1992), la succión es una cantidad de energía que evalúa la capacidad de un suelo para retener agua. Cuando el agua libre se traslada al ambiente del suelo, el agua puede retenerse o absorberse por el suelo. Para perder el agua adsorbida, se requiere energía externa para contrarrestar las fuerzas de retención del agua. La energía aplicada por unidad de volumen de agua viene a ser la que se conoce como succión del suelo. En términos generales, entre más seco esté el suelo, la succión será mayor.

2.6.1. Componentes de la succión

La succión del suelo tiene dos componentes principales, la succión mátrica y la succión osmótica. La suma de ambas componentes es conocida como succión total. Cuando el agua del suelo se encuentra bajo presión hidrostática mayor que la atmosférica, se considera que su potencial de presión es positivo. Cuando la presión es menor que la atmosférica el potencial de expansión se toma como negativo. Este potencial de presión negativo se denomina “potencial mátrico” o “succión mátrica”, la cual resulta de las fuerzas capilares y de adsorción que se genera dentro de la matriz de partículas sólida del suelo, como se puede observar en la Figura 2-4.

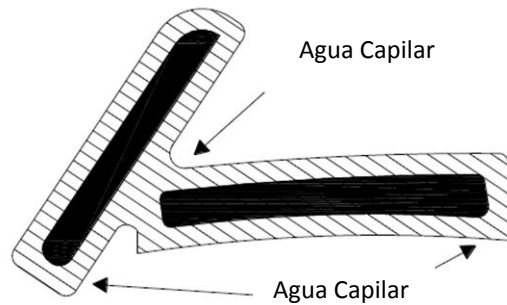


Figura 2-4. Agua en un suelo parcialmente saturado, sujeta a la capilaridad y a la adsorción (Lee & Wray, 1992).

Existen tres componentes principales de la succión:

Succión mátrica. Es la diferencia de presión que hay a través de una membrana que separa al suelo de una solución suelta in situ. La membrana será permeable para la solución, pero no para las partículas sólidas o el aire.

Succión osmótica. Es la diferencia de presión que hay de una membrana semipermeable que separa la mayoría de las fases del agua libre y la solución de suelo. Influye principalmente la composición mineralógica y la concentración de sales en este tipo de succión.

Succión total. Es la suma de la succión mátrica y la osmótica. También se define como la diferencia de presión a través de una membrana semipermeable que separa al agua pura del suelo que contiene solución.

Lo anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$h = h_m + h_s \quad (2-4)$$

donde: h = Succión total de un suelo (kPa), h_m = Succión mátrica de un suelo (kPa), h_s = Succión osmótica de un suelo (kPa).

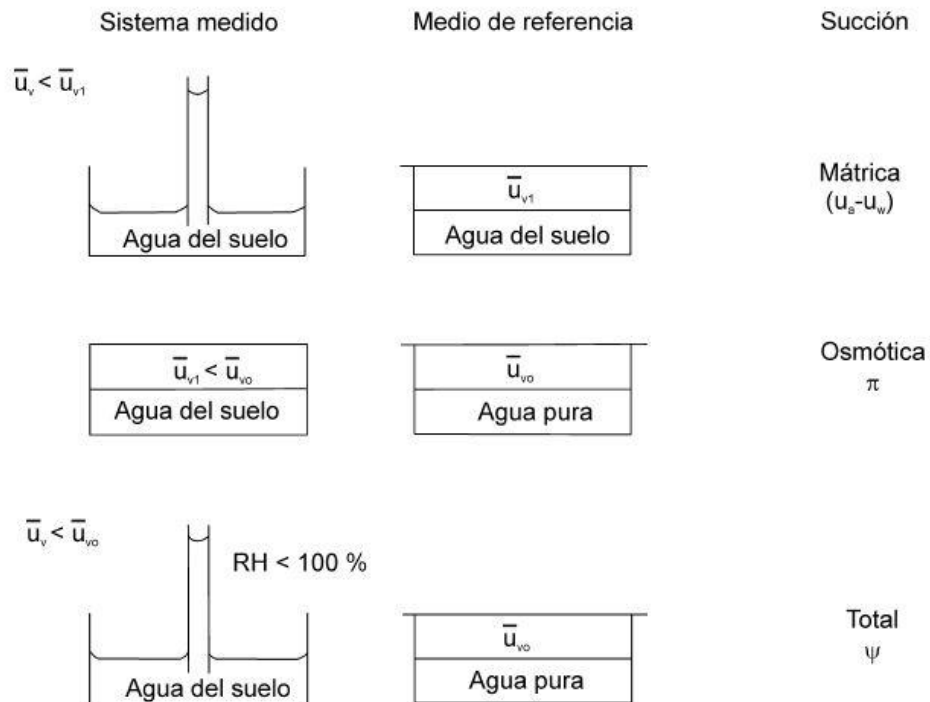


Figura 2-5. Succión total y sus componentes: succión mátrica y osmótica (Fredlund & Rahardjo, 1993).

La relación entre la succión y el grado de saturación (o contenido de agua) es llamada Curva de Retención de Agua-Suelos (SWRC por sus siglas en inglés), las cuales no son únicas para cada suelo. Éstas se componen de dos trayectorias distintas: Secado y Humedecimiento.

En la agricultura moderna se ha incrementado el uso de modelos matemáticos que permiten caracterizar el movimiento del agua y el transporte de solutos en la zona no saturada, siendo necesario conocer las propiedades hidráulicas de los suelos, entre las que se encuentra la SWRC.

2.7. Curvas de Retención

El flujo en el suelo fluye de un punto con mayor energía potencial hacia otro de menor potencial. Este se define como la energía potencial por unidad de agua, es decir, es el trabajo requerido para llevar dicha unidad desde un estado de

referencia estándar hasta el punto bajo consideración. El fluido en el suelo está sujeto a campos de fuerzas que resultan de la atracción de la matriz sólida, la presencia de solutos, la acción de la presión externa, la atracción gravitacional y otro. El potencial gravitacional se mide desde la superficie de los suelos ($-z$) y el de presión es una función del contenido de agua (θ). Dicho potencial de presión se considera positivo si el fluido en el suelo está a una presión mayor a la atmosférica y negativo con una presión menor a la atmosférica. Este último es llamado potencial mátrico y, cuando es tomado en valor absoluto se le denomina succión mátrica (ψ). Este resulta de las fuerzas capilares y de adsorción debido a la estructura del suelo (Pliego, 2012).

Existen diversas técnicas para medir la succión mátrica del suelo, estas se pueden dividir en métodos directos e indirectos. Los métodos directos miden la presión negativa del fluido en los poros del suelo (u_f), entonces la succión mátrica es ($u_a - u_f$), siendo (u_a) la presión (atmosférica) de aire en los poros. Entre los métodos directos más usados están los tensiómetros y la técnica de traslación de ejes. Entre los métodos indirectos se encuentra la técnica del papel filtro en “contacto” con el suelo y los sensores de conductividad térmica y eléctrica (Meza, 2012). Sin embargo, se debe tener mucho cuidado al realizar las mediciones en el laboratorio y el campo, porque pueden ser lentas, engorrosas, y difícil de implementar (Galaviz-González, 2013).

De esta manera, a la relación que existe entre el contenido de agua (ω o θ) o grado de saturación (S_r) del suelo con su respectiva succión mátrica (ψ) se le conoce como Curva de Retención Suelo-Agua (SWRC por sus siglas en Inglés) (ver Figura 2-6) (Meza, 2012), y a la relación del contenido de gasolina (g) o grado de saturación de gasolina (G_g) con la succión mátrica del suelo es denominada Curva de Retención Suelo-Gasolina (SGRC).

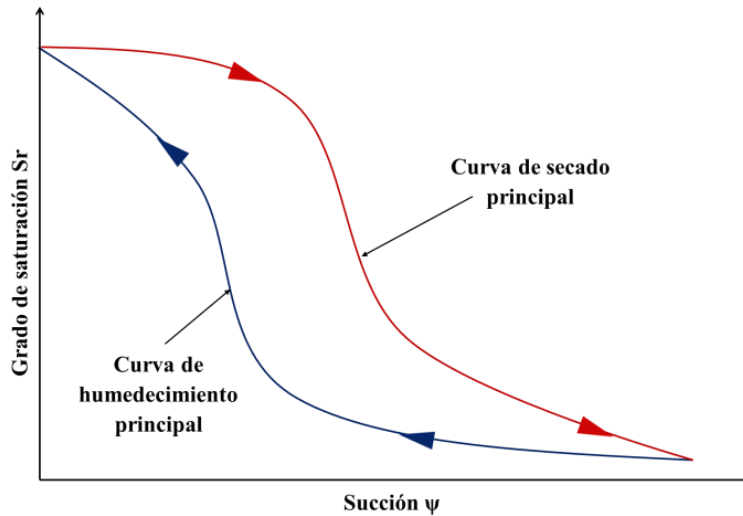


Figura 2-6. SWRC idealizada, con las curvas principales de humedecimiento–secado, Mostrando el fenómeno de histéresis (Han-Chen, *et al.*, 2005).

Las curvas de retención pueden ser usadas para estimar diversos parámetros utilizados para describir el comportamiento del suelo no saturado (Fredlund & Xing, 1994) y su uso se ha convertido en un aspecto importante en la mecánica de suelos no saturados debido a que estos materiales presentan un acoplamiento hidromecánico, es decir, su comportamiento volumétrico y su resistencia dependen no solo del esfuerzo aplicado y la succión, sino también de su grado de saturación (S_r o G_w) que depende de su contenido de humedad (ω o θ o g) (Horta, *et al.*, 2012).

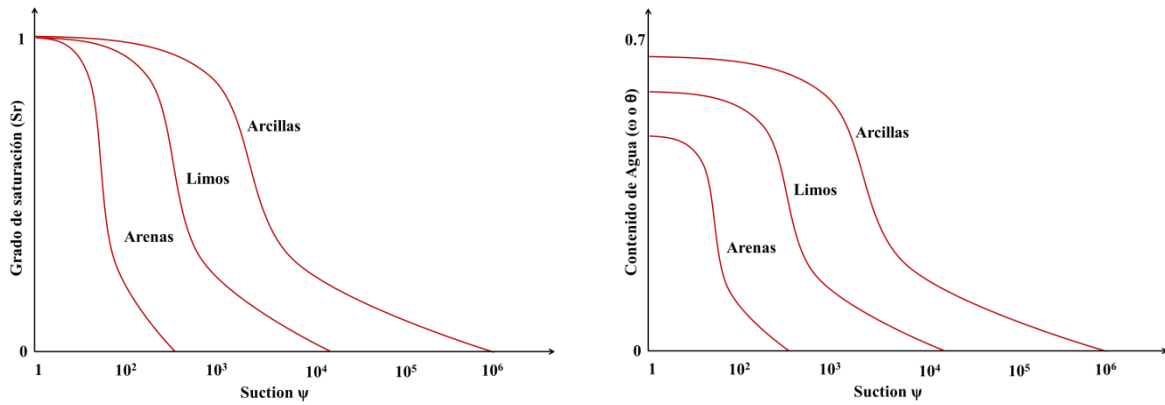


Figura 2-7. Curvas características de succión, representativas de arenas, limos y arcillas. (Fredlund & Xing, 1994)

La relación contenido de agua-succión y por tanto, la forma de la SWCC, se ve influenciada por la distribución de los tamaños de poros, la distribución de tamaños de partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo (Lu & Likos, 2004). La Figura 2-7, muestra las curvas características de succión, representativas de arenas, limos y arcillas, donde se observa la forma de la curva, asociada al tipo de suelo, que indirectamente indica la influencia del tamaño de partículas y el tamaño de poros. El valor de entrada de aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la desaturación del suelo.

La SWRC no es única para un suelo, su forma y posición no son las mismas, es decir, la trayectoria de humedecimiento y de secado son diferentes, este fenómeno es llamado histéresis (Meza, 2012). Este fenómeno es dictado por la textura y la estructura del suelo, mientras mayor es el contenido de arcilla mayor es la retención de agua por un valor dado de succión (ψ) y la pendiente de la curva es más suave (Pliego, 2012), esto se debe a su Distribución de Tamaño de Poros (PSD por sus siglas en inglés), ya que presenta gran diversidad de poros. Por otro lado, para los suelos arenosos las pendientes son más fuertes, debido a que su PSD es más homogénea. Sin embargo, el comportamiento de la SGRC no ha sido determinado, por ello, no se ha definido si existe o no dicho fenómeno.

El fenómeno de histéresis se puede explicar por medio de un modelo poroso que considere la presencia de poros interconectados y repartidos aleatoriamente (Rojas & Chávez, 2013).

La histéresis de la SWRC es un factor importante del comportamiento del suelo que debe tomarse en cuenta durante los procesos humedecimiento-secado (Lu & Likos, 2004) puesto que la relación esfuerzo-deformación, se ve afectada por cambios en el contenido de agua de un suelo no saturado, y éstos a su vez dependen de un proceso hidrológico complicado, como la infiltración, evaporación y evapotranspiración los cuales producen ciclos de humedecimiento y secado, que provocan curvas primarias de secado (desde un estado saturado a un estado seco) y curvas primarias de humedecimiento (desde un estado seco hasta el estado saturado) que representan los ciclos a los que se expone el suelo debido al proceso hidrológico.

2.7.1. Fenómeno de Histéresis

El fenómeno de la histéresis ha tratado de ser explicado mediante diferentes hipótesis, se puede citar a la referida a los meniscos de interface suelo-agua, formulada por Wheeler *et al.* (2003). La Figura 2-8 muestra un poro lleno de agua, con meniscos curvos, separando el agua entre el poro lleno de aire y el poro lleno de agua. A medida que la succión es incrementada durante un proceso de secado, el radio de curvatura de los meniscos aumenta hasta su curvatura máxima, y éstos se mueven de la posición 1 a la posición 2 mostrado en la Figura 2-8. Este movimiento de los meniscos es modelado como un proceso reversible (*i.e. proceso elástico*). Si la succión es incrementada más allá de un valor crítico, el aire entrará en el poro, y el agua será desplazada en los poros llenos de agua. La entrada del aire en el poro es un proceso no- reversible (*i.e. proceso plástico*), debido a que el poro no se llenara inmediatamente con agua si la succión es reducida (Pardo & Salinas, 2004).

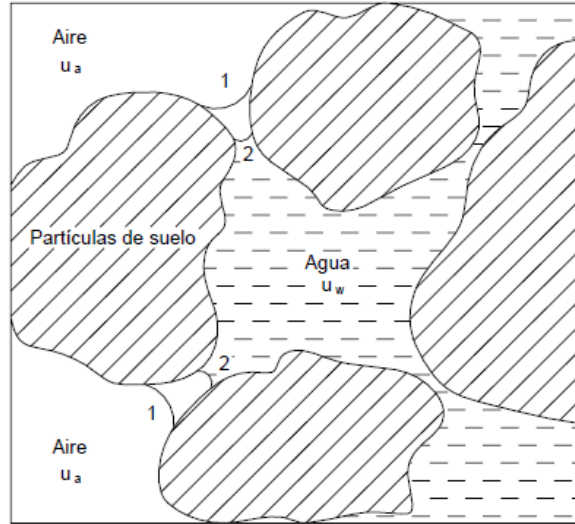


Figura 2-8. Movimiento de la interfaz aire – agua (Wheeler, *et al.*, 2003).

2.8. Modelo empírico de Van Genuchten

Este modelo es el más usado para predecir o realizar el ajuste de la curva de retención de agua para determinar la conductividad hidráulica del suelo (este último parámetro no será discutido en este documento). El modelo se centra en obtener el grado de saturación experimental a partir de los contenidos de humedad experimental, residual y saturado, una vez obtenido, se calcula el grado de saturación efectivo o de ajuste utilizando la succión experimental y tres parámetros empíricos que propone Van Genuchten. Para obtener relativamente expresiones analíticas de predicción de forma cerrada para la conductividad hidráulica no saturada, Van Genuchten (1980) asumió relaciones únicas entre los parámetros m y n (Galaviz-González, 2013).

$$G_s = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2-5)$$

$$G_{s_e} = [1 + \alpha \psi^n]^m \quad (2-6)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2-7)$$

dónde: G_s = grado de saturación experimental, θ = contenido de humedad experimental, θ_r = contenido de humedad residual, θ_s = contenido de humedad saturado, G_{s_e} = grado de saturación efectivo o de ajuste, ψ = valor de la succión experimental, m , n , α = parámetros empíricos.

2.9. Suelo contaminado

2.9.1. Contaminación

La contaminación es la alteración de las características físicas, químicas o biológicas de los factores ambientales en grado tal que supongan un riesgo inaceptable para la salud humana o los ecosistemas.

2.9.2. Contaminación del suelo

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 al medio ambiente (Sabroso & Pastor, 2004).

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en concentraciones que superan la capacidad de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades (Macías, 1993). Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de edificación liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos. Conforme se desarrolla esta concentración residual metálica, estos elementos que inicialmente están constituyentes no asimilables de los minerales primarios pasan a formas más activas, solubles y biodisponibles que influyen negativamente sobre la actividad biológica (Macías, 1993).

Izdebska-Mucha & Trzcinski (2008) hicieron un estudio en una arcilla contaminada con petróleo en el que, por medio de un análisis con un microscopio de barrido electrónico observaron una variación en la distribución del tamaño de poro; la cantidad de microporos disminuyó mientras que los mesoporos se incrementaron. Además, también observaron una reorientación de las partículas lo que generó una distribución isotrópica de las mismas.

También, al evaluar el tamaño de grano en un suelo arcilloso contaminado, Martínez & López (2001) observaron un cambio en el contenido de arena, ya que la cantidad de éstas tiende a aumentar, por ende, el contenido de arcilla disminuye y la cantidad de limos se mantiene sin una variación importante con respecto a la masa de suelo no contaminado.

La textura se ve modificada debido a la adsorción de contaminantes por las partículas de suelo mediante interacciones electrostáticas del tipo fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno, puentes de agua y puentes catiónicos (Yong, *et al.*, 1994); (Pignatello & Xing, 1996).

2.9.3. Efectos y riesgos relacionados con los contaminantes

Los suelos contaminados pueden tener efectos muy diversos, desde el riesgo tóxico para la salud humana hasta pérdidas de recursos naturales y económicos (Sabroso & Pastor, 2004).

Los principales riesgos que pueden suponer un suelo contaminado son:

- Riesgo toxicológico para la salud humana:
 - Por inhalación: problemas alérgicos y respiratorios desde leves hasta muy graves.
 - Por ingestión: por desconocimiento al cultivar suelos contaminados.
 - Por contacto directo con la piel: alergias y problemas cutáneos en trabajadores que manipulan este tipo de suelos.

- Riesgo de contaminación de aguas superficiales, aguas subterráneas, atmósfera, sedimentos de río, del aire interior de las instalaciones, etc.
- Riesgo físico: explosión o fuego, corrosión de estructuras o efectos en las propiedades mecánicas del suelo en las excavaciones.
- Riesgo de utilización de agua de abastecimiento contaminada.
- Riesgo de contaminación de alimentos cultivados y animales de granja por utilización de agua subterránea contaminada.

Hay que tener en cuenta que los efectos causados por un suelo contaminado son, en general a largo plazo y en ocasiones las consecuencias no se detectan de inmediato, por lo que los riesgos potenciales pueden tardar décadas en manifestarse con efectos de gran magnitud.

2.10. Importancia del estudio de los suelos contaminados

Es de suma importancia evaluar un suelo al contaminarse con hidrocarburos, ya que existen causas y consecuencias que podrían originarse si su microestructura y propiedades físico-químicas se alteran, ya que estas definen la capacidad de carga y la estabilidad del suelo (Parr, *et al.*, 1992).

Si ocurre un derrame en una zona donde existe una edificación y las propiedades mecánicas del suelo se ven afectadas pueden ocasionar pérdidas desde económicas hasta, en un caso extremo, pérdidas humanas por la falta de estabilidad en la estructura; de conocerse la reacción que tendrá el suelo ante un contaminante se pueden tomar medidas de precaución y soluciones (Pons-Jiménez, *et al.*, 2011).

El destino de los hidrocarburos en el suelo se rige por diversos factores relacionados con el ambiente en el que se encuentra, así como por las propiedades y características químicas del compuesto. Cuando ocurre un derrame, los combustibles inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio lo permite. Las características propias de los combustibles como su

densidad, viscosidad y solubilidad en el agua, así como las propias del suelo, entre las que destaca el tamaño de partícula, su capacidad de adsorción, permeabilidad y profundidad al nivel freático, determinan la acumulación, migración y distribución de combustibles en el subsuelo (Saval & Lesser, 2000).

El suelo y el agua son dos recursos fundamentales del ambiente agrícola. Con los avances en las nuevas tecnologías agrícolas, grandes cantidades de agua y productos químicos son aplicados al suelo cada año. Este uso excesivo, ha puesto en peligro nuestros recursos, en adición existe un incidente de contaminación de los acuíferos y las aguas superficiales, erosión, etc. En respuesta a estos problemas ambientales ha habido un incremento en los esfuerzos por desarrollar prácticas de manejo agrícola sostenibles, que integren los elementos correspondientes al continuo agua-suelo-planta-atmósfera (Parr, *et al.*, 1992).

Por ello, es necesario conocer las propiedades hidráulicas del suelo, curvas de retención de agua-suelo (SWRC) y la función conductividad hidráulica en función (HCF) de la humedad y el empleo de modelos hidrológicos. La ventaja del uso de modelos analíticos en los estudios de agua en el suelo incluye una fácil comparación de propiedades hidráulicas de los suelos, interpolación de datos faltantes e información adecuada para la aplicación de los modelos de flujo en la zona no saturada (Parr, *et al.*, 1992).

En la actualidad no se tienen curvas características de un suelo con un contaminante en específico, por lo que esto es una parte importante para la aplicación práctica en cuanto a estudios de flujo o prototipos.

2.11. Características de los hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo (Chappin & Summerlin, 1988); (PEMEX, 1988).

Se considera como mezcla compleja de gases, líquidos y sólidos, extendiendo cantidades combinadas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de contener compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales (PEMEX, 1988).

El petróleo tiene una porción de 76% a 86% de carbono y de 10% a 14% de hidrógeno. Los hidrocarburos se clasifican de la siguiente forma:

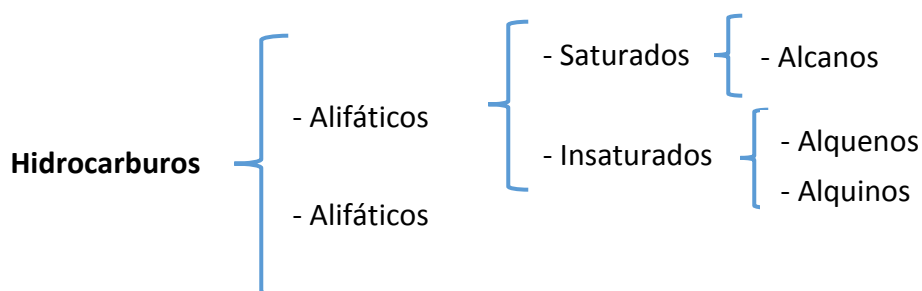
- Hidrocarburos piogénicos: éstos son sintetizados por casi todas las plantas, animales terrestres y marinos, incluyendo a la microbiota, bacterias, plancton marino, diatomeas, algas y plantas superiores (Bedair & Al-Saad, 1992).
- Hidrocarburos antrópicos: éstos son introducidos como resultado de la actividad humana. Los procesos de combustión industrial contribuyen con la contaminación debido principalmente al humo generado por la quema del carbón, combustibles fósiles y petróleo refinado, las descargas de aguas residuales municipales, las actividades de transporte y los derrames son algunas de las principales fuentes de estos contaminantes (Bidleman, et al., 1990).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), producidos por las actividades humanas, están formados por dos o más anillos de benceno fusionados, los cuales difieren en el número y posición del anillo aromático.

Su importancia está relacionada con la movilidad debido a su peso molecular: los HAP de alto peso molecular son relativamente inmóviles y, por ende, de baja volatilidad y solubilidad. Algunos compuestos como naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenentreno, antraceno, fluoranteno y pireno por mencionar algunos, son considerados como contaminantes prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US Environmental Protection Agency, USEPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Europea (CE) debido a sus efectos carcinogénicos (Menzie, et al., 1992).

Estos compuestos se encuentran distribuidos en el suelo, mar, sistemas pluviales y sedimentos y su presencia se ha atribuido principalmente a los derrames de petróleo y descarga de plantas petroquímicas, aun cuando se puede deber al transporte atmosférico por los aportes de la combustión (Padilla, 1989).

Los hidrocarburos son compuestos de carbono e hidrógeno que, pueden clasificar de la siguiente forma:



2.12. Petróleo

El petróleo es un producto de origen fósil, formado por una mezcla compleja de hidrocarburos. Es de consistencia muy viscosa, más ligero que el agua (densidad alrededor de 0.80 kg/dm^3 a 0.95 kg/dm^3), de color negro o pardo muy oscuro y olor penetrante.

Una vez se extrae petróleo, ya sea en torres de extracción o por medio de balancines actuando como bombas, se transporta a las refinerías. Allí, el combustible se separa en fracciones de hidrocarburos que tienen propiedades parecidas. El proceso denominado destilación fraccionada y se lleva a cabo en columnas de fraccionamiento. En este proceso el petróleo se calienta de manera que los compuestos que lo conforman se evaporan. En primer lugar se obtienen los menos volátiles y al final, los más volátiles. Las fracciones que se obtienen de la destilación se deben someter a diferentes procesos antes de ser utilizados. Una de las fracciones obtenida es la gasolina, llamada gasolina de destilación.

2.12.1. Gasolina

La gasolina es un combustible fósil líquido, derivado del petróleo (NOM-086,2015); es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, olefínicos, aromáticos y alifáticos obtenida del petróleo por destilación fraccionada, que se utiliza en motores de combustión interna. Tiene una densidad de 680 kg/m³. Es un hidrocarburo de fracción ligera cuya composición química va desde C₅H₁₂ hasta C₉H₂₀. Uno de los componentes de la gasolina es la nafta ligera.

En las refinerías, el petróleo crudo se separa en fracciones por destilación con base en los puntos de ebullición como se muestra en la Tabla 2-2. El índice de octano de una muestra de gasolina en particular es una medida de su capacidad para arder de manera uniforme, sin detonación.

Tabla 2-2. Puntos de ebullición (Burns, 2003).

<i>Fracción del petróleo</i>	<i>Átomos de carbono por molécula</i>	<i>Intervalo de ebullición (°C)</i>	<i>Usos</i>
Mezcla gaseosa	De C ₁ a C ₄	Menos de 20	Combustible de propano, gas LP y gas en cilindros.
Gasolina de destilación directa	De C ₅ a C ₁₂	De 30 a 200	Combustible para motores.
Queroseno, combustóleo	De C ₁₂ y C ₁₈	De 180 a 350	Combustible para aviones a reacción, combustible Diesel, combustible para hornos.
Lubricantes	C ₁₈ y más	350 y más	Lubricantes, material para craqueo
Parafina	C ₂₀ y más	Sólidos de bajo punto de fusión	Velas, papel encerado
Asfalto	C ₄₀ y más	Residuos viscosos	Revestimiento de caminos, alquitrán para techos.

2.12.2. Diésel

El diésel es un combustible hidrocarburo y está conformado por compuestos parafínicos, naftalénicos y aromáticos, su contenido de carbono se encuentra entre C₁₀ y C₂₂, se considera como un hidrocarburo de fracción media.

El contaminante más importante contenido en el diésel es el azufre, por medio de la combustión se convierte en óxido de azufre que al entrar en contacto con la humedad del aire se transforma en ácido sulfúrico, también contiene nitrógeno que se libera como óxido nitroso, los cuales son causantes de la lluvia ácida. Las propiedades que caracterizan a este combustible son el índice de cetano, que mide la calidad de la ignición; el contenido de azufre, a menor contenido de azufre, el diésel es más limpio y menos contaminante y finalmente, su densidad y viscosidad. Tiene una densidad de 832 kg/m^3 .

2.13. Problemática a causa de los hidrocarburos en México

En la actualidad, el transporte de los hidrocarburos y sus derivados se realiza mediante el uso de buquetanques, ferrocarriles, autotanques y ductos (Romo, *et al.*, 2011). La transportación a través de ductos es considerada como la opción más segura, práctica y económica.

De acuerdo a la PROFEPA (2001) en el periodo de 1997 al 2001, PEMEX fue responsable de 64.50% de las emergencias ambientales en el país por sustancias peligrosas (1672 desastres ambientales de un total de 2592). Más del 80% de las emergencias son causadas por transporte y más del 70% se presenta en ductos; un 57% provoca derrames, principalmente de petróleo crudo, combustóleo, diesel, gasolina, turbosina, gas natural y amoniaco (Jacott, *et al.*, 2011).

Existen tres formas en que suceden los derrames: la primera corresponde a aquellos producidos por los accidentes carreteros o ferroviarios; la segunda a las fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción y la tercera forma obedece a aquellos sitios donde de manera deliberada se construyen tomas clandestinas en ductos y que en la mayoría de los casos quedan fuera de control produciendo el derrame (Álvarez-Manilla, *et al.*, 2002).

Algunas causas fundamentales del incremento de accidentes en los poliductos de Pemex han sido: la inadecuada evaluación de los mismos y la falta

de gestión para erradicar esta problemática, adicionalmente no hay una base de datos histórica de accidentes en ductos de transporte de hidrocarburos disponible de manera oficial en el país, estas circunstancias repercuten negativamente en la funcionalidad de ductos en México (Olivera & Rodríguez, 2005).

En resumen, las propiedades físicas del suelo más afectadas por hidrocarburos son su estructura, debido a la ruptura de los agregados, el aumento de la retención del agua en la capa superficial y el potencial hídrico; mientras que las propiedades químicas perjudicadas son el aumento de carbono orgánico, la disminución de su pH, el aumento de manganeso y hierro intercambiable y el aumento de fósforo disponible (Ortínez, *et al.*, 2003).

2.14. Hidrocarburos en el suelo

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas. Además, las características del medio, como son la unidad del suelo, permeabilidad, estructura, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del manto freático, factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial también tiene una gran influencia. Todas las variables en conjunto definen el tamaño y la distribución tridimensional del frente de contaminación en una zona específica (Ortínez, *et al.*, 2003). En la tabla 2-3 se indican algunos parámetros del compuesto químico, suelo y ambiente que influyen en el transporte a través del suelo (Ortínez, *et al.*, 2003).

Los compuestos orgánicos ligeros como gasolinas, aceites y petróleo crudo tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea. Los compuestos orgánicos densos, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden moverse en dirección del flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad (Ortínez, *et al.*, 2003).

Tabla 2-3. Parámetros que influyen en el transporte de sedimentos (Ortínez, *et al.*, 2003).

Parámetros del Contaminante	Parámetros del Suelo	Parámetros Ambientales
Solubilidad	Contenido y retención de agua	Temperatura
Presión de vapor	Porosidad, densidad y permeabilidad	Precipitación
Número y tipo de grupos funcionales	Contenido arcilla	Evapotranspiración
Polaridad	Contenido de materia orgánica	
	Profundidad de agua subterránea	

Probablemente el componente más importante del suelo en relación con la persistencia de sustancias tóxicas es la arcilla. La persistencia aumenta cuando más pequeñas son las partículas debido a que aportan un área superficial mayor para la adsorción de los productos químicos.

2.14.1. Propiedades mecánicas de un suelo con presencia de hidrocarburos.

Nazir (2011) utilizó el método de Casagrande (norma ASTM D423-66, 1972) para calcular los límites de consistencia de una arcilla con alto contenido de montmorillonita contaminada con petróleo; a pesar de esperar valores altos en sus propiedades índice debido al mineral contenido, obtuvo valores bajos, asumiendo el descenso de los valores a altos contenidos de limos y arenas. Además, se prepararon muestras a distintos periodos de contaminación para evaluar los límites de consistencia a cada tiempo transcurrido, observándose una disminución en los límites de consistencia durante los primeros tres meses de contaminación y pasado este tiempo, los valores se mantienen constantes, tal como se muestra en la Figura 2-9 (Antonio, 2014).

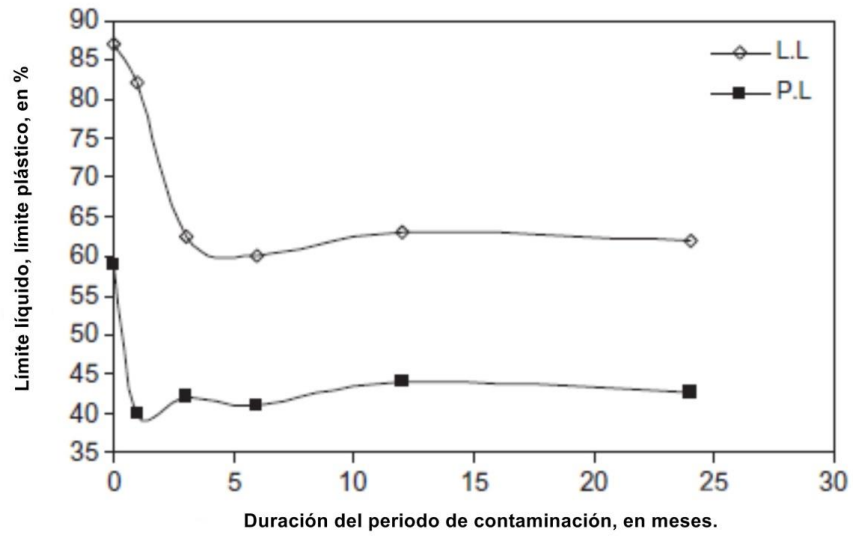
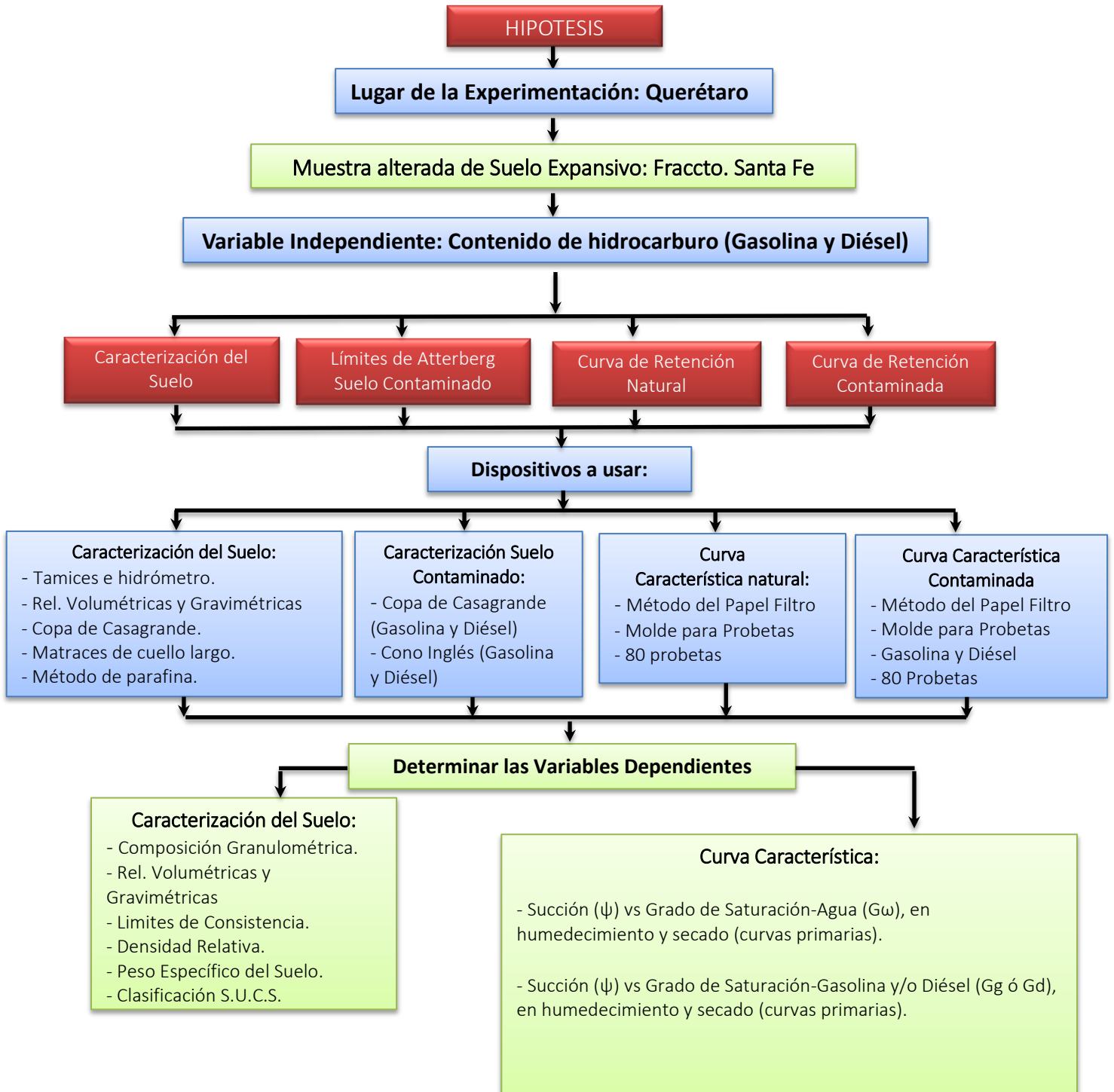


Figura 2-9. Variación de los límites de consistencia a través del tiempo (Nazir, 2011).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

El siguiente diagrama de flujo, muestra en resumen la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación.



3.1. Localización del suelo en estudio

El estado de Querétaro se encuentra ubicado en el centro de México, a $20^{\circ} 36' 00''$ de latitud norte y $100^{\circ} 23' 00''$ de longitud oeste. Limita al norte con el estado de San Luis Potosí, al oeste con Guanajuato, al este con Hidalgo, al sureste con el estado de México y al suroeste con Michoacán. Tiene una superficie aproximada de $11,769 \text{ km}^2$.

La muestra de suelo en estudio se tomó de un predio localizado en el fraccionamiento Santa Fe, el cual pertenece al municipio de Corregidora, Querétaro ubicado a $20^{\circ} 35' 10''$ Latitud Norte y $100^{\circ} 26' 50''$ Longitud Oeste (ver Figura 3-1). En la zona predominan los suelos de origen aluvial constituidos por mayor parte de suelos finos (arcillas y limos) en combinación con suelos granulares (arenas).



Figura 3-1. Localización geográfica del sitio del suelo a estudiar (Google earth, 2015).

3.2. Muestreo

Se realizó la extracción de una muestra de suelo alterado, así como también la extracción de una pequeña muestra de suelo inalterado para la determinación del peso específico en estado natural. Debido a que fue el único predio al que se tuvo acceso para realizarlo. Anteriormente, éste mismo predio fue utilizado para la realización de muestreos previos, por lo cual, se tuvo la certeza

que se extrajo material alterado. Dicho material es producto de la excavación de cepas. Cabe mencionar que dicho predio no se encuentra contaminado.

3.3. Caracterización del suelo.

Para la caracterización del suelo se emplearon distintos procedimientos para la determinación de sus propiedades índice y mecánicas: contenido de agua (ω), determinación del peso específico de la masa de suelo (γ_m), peso específico relativo de los sólidos del suelo (S_s), análisis granulométrico del suelo vía seca y húmeda, límites de consistencia (Atterberg), clasificación del suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).

Las pruebas antes mencionadas se describen a continuación.

3.3.1. Determinación del Contenido de Agua (ω)

Consistió en tomar el peso de una muestra representativa (W_m) para que sea colocada dentro de un recipiente resistente al calor, se introdujo dicho recipiente junto con la muestra en un horno durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C. Una vez que transcurrieron las 24 horas, se extrajo la muestra y se determinó su peso nuevamente (W_s). La diferencia entre W_m y W_s es el peso del agua (W_w), por lo tanto el contenido gravimétrico de agua (ω) representado en porcentaje (%) se expresa de la siguiente manera (ASTM D2216-10, 2010).

$$\omega(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (3-1)$$

Esta prueba se realiza tan pronto como sea posible después del muestreo.

3.3.2. Determinación del Peso Específico de la masa de suelo (γ_m)

De la muestra inalterada de suelo se extrajo un fragmento, éste se pesó para conocer el peso de su masa (W_m), enseguida se puso a calentar parafina en

un recipiente a una temperatura de 60 °C para fundirla. Mientras la parafina llegaba a su temperatura de fusión, se sujetó el fragmento de suelo con un hilo y se sumergió completamente en la parafina líquida, se toma el peso del fragmento de suelo con la parafina (W_{mp}). Finalmente se obtuvo el peso sumergido del fragmento de suelo con parafina en agua (W_{mps}). Conociendo el peso específico de la parafina (ρ) es posible encontrar el valor del Peso Específico de la masa de suelo (γ_m) (ASTM D4531-92, 2008).

3.3.3. Determinación del Peso Específico relativo de los sólidos del suelo (S_s)

Se tomó una muestra de suelo alterado colocándolo por un tiempo de 24 horas en el horno. Se tomó 50 g de ese suelo seco (W_s) dejándolo saturando con agua por 24 horas. Se toman dos matraces de cuello largo, vertiendo la muestra saturada con el mínimo de agua posible en uno de los matraces. Se agregó agua a ambos matraces hasta $\frac{3}{4}$ de su capacidad. Se sometió a calor hasta 80° C a baño maría, esto para extraer todo el aire atrapado posible, para completar el proceso de extraer el aire, se hizo vacío con una bomba por un lapso de 15 minutos en ambos matraces y al mismo tiempo. Finalmente se aforó el matraz que contiene la muestra de suelo con el agua del otro matraz, se secó perfectamente el cuello del matraz y se determinó su peso (W_{fws}) (ASTM D854-10, 2010).

3.3.4. Análisis granulométrico vía seca (por mallas)

Se tomó una muestra de suelo, se extendió y se sometió a secado. Se realizó un cuarteo del cual se obtuvo una muestra representativa la cual fue sometida a la prueba de tamizado mediante varias mallas (1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", Nos. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200), el retenido de cada tamiz se pesó, lo cual representa un porcentaje del total del cuarteo de la muestra respectivamente. De esta manera se obtuvo la curva granulométrica que se constituye con su composición granulométrica o tamaño de partículas y el % acumulado de cada malla. Además se pudo determinar el porcentaje de material de Grava (% Grava), arena (% Arena) y finos (% finos) (ASTM D2487-06, 2006).

3.3.5. Análisis granulométrico vía húmeda (por hidrómetro)

Se tomaron 50 g de muestra de suelo tamizado por la malla #200, dejándola saturar durante 24 horas en un recipiente. Posteriormente se colocó el material saturado junto con una preparación de un defloculante en proporciones 5% de hexametáfosfato con 100 cm³ de agua en una probeta de 1000 ml de agua aproximadamente. Se agitó la probeta de manera vertical y de un lado a otro durante 15 minutos (hasta que el material se homogenizo), se colocó la probeta en una superficie fija y horizontal. Posteriormente se introdujo el hidrómetro y se tomaron las lecturas de densidad y temperatura (ASTM D422-63, 2007).

3.3.6. Límites de Consistencia (Atterberg)

Dependiendo de la cantidad de agua se pueden distinguir los estados de consistencia: Líquido, semilíquido, plástico, semisólido y sólido.

3.3.6.1. Limite líquido (LL)

Se define como la frontera entre el estado semilíquido y plástico, correspondiente a una resistencia al corte de 25 g/cm². Este se determinó por el método de la Copa de Casagrande. El proceso consistió en tomar una muestra de suelo secado al aire. Después fue tamizada por la malla No. 40, se colocó en un recipiente con agua durante 24 para someterlo a un proceso de saturación. Posteriormente se mezcló y homogenizó perfectamente el material saturado y se colocó en la Copa de Casagrande como se muestra en las figuras 3-2 y 3-3, se programó el aparato para que éste diera 2 (dos) golpes por segundo aproximadamente. El límite líquido se determinó mediante el cálculo de la humedad del material en relación a 25 golpes (ASTM D4318, 2010).



Figura 3-2. Homogenización del material saturado para ser vertido en la Copa de Casagrande.



Figura 3-3. Colocación del material saturado en la Copa de Casagrande.

Para la determinación del límite líquido del suelo contaminado con gasolina se realizó inicialmente con la Copa de Casagrande, pero estando en combinación el suelo con la gasolina, éste tomó una textura rígida. Derivado de esta situación, se prosiguió a utilizar la prueba del Cono Inglés; la cual consistió en tomar una muestra de suelo secado al aire para después ser pasada por la malla No. 40. Posteriormente, la muestra fue colocada en el horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas. Una vez enfriado, el suelo fue saturado únicamente con gasolina en un recipiente, dejándolo reposar 24 horas. Posterior a esto se mezcló

y homogenizó para luego colocarlo en tres capas dentro del cilindro del cono de penetración, procurando dar pequeños golpes para no dejar aire atrapado.

Se colocó el cilindro sobre la base del equipo del Cono de penetración, colocando la punta del cono sobre la superficie del cilindro. Se accionó el dispositivo eléctrico que libera al cono y se dejó caer sobre el material, el límite líquido se determina cuando el cono penetra al suelo 200 mm.

Para la determinación del límite líquido del suelo contaminado con diésel, se realizó el mismo proceso descrito que para la determinación del límite líquido con gasolina, solo que en lugar de añadir gasolina se colocó el diésel.

3.3.6.2. Limite plástico (LP)

La determinación del límite plástico del suelo estudiado, consistió en realizar rollitos de 3.2 mm de diámetro. Los rollitos se colocaron en una flanera y se repitió el proceso anterior hasta se tuvo un peso de 6 g de estos rollitos, enseguida se ingresaron al horno para determinar su contenido de agua, de esta manera se determinó el límite plástico del suelo (ASTM D 4318, 2010).

Otro parámetro que se determinó fue Índice de Plasticidad (IP), el cual es muy importante para la clasificación de suelos:

$$IP = LL - LP \quad (3-2)$$

3.3.6.3. Contracción Lineal y Límite de Contracción

Este procedimiento se determinó cuando el suelo tuvo la consistencia líquida lo más cercana posible a los 25 golpes en la Copa de Casagrande. Se midió la longitud inicial (L_0) de la barra de contracción y posteriormente se engrasó con aceite. Posteriormente, se vertió el material en tres capas golpeando sobre la mesa en cada capa con el fin de expulsar el aire atrapado. Se pesó la barra de contracción con el material enseguida dejándolo secar de manera paulatina en la cámara de temperatura constante durante 2 días. Posterior a este tiempo se

colocó la barra de contracción con material en el horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas o hasta alcanzar un peso seco constante. Finalmente, se extrajo la barra de contracción del horno midiendo su longitud (L_f) (ASTM D4318, 2010).

Se calculó la contracción lineal (CL) con la siguiente expresión:

$$CL = \frac{(L_o - L_f)}{L_o} \times 100 \quad (3-3)$$

Para la determinación del límite de contracción, se necesitó una caja Petri, de la cual se determinó su volumen (V_1). Se tomó una muestra de suelo correspondiente al límite líquido o lo más cercano a este. Se llenó la caja Petri en tres capas, dándole golpes sobre la mesa para sacar el aire existente en cada capa. Se pesó la caja petri con el material húmedo (W_m). Enseguida se colocó fue sometido a un proceso de secado paulatino en una cámara de temperatura constante durante 2 días. Posterior a este tiempo, se ingresó al horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso seco constante. Finalmente, se pesó la caja petri con el material (W_s) y se determinó el volumen de la muestra seca (V_2) (puede realizarse mediante la inmersión en mercurio o parafina) (ASTM D4318, 2010).

El límite de contracción se determinó con la siguiente expresión:

$$LC = \left[\frac{W_m - W_s - \gamma_0 (V_1 - V_2)}{W_s} \right] * 100 \quad (3-4)$$

3.4. Medición de la Succión.

El método usado para la prueba de succión fue la técnica del papel filtro de acuerdo a la norma ASTM D5298-10 (2010). El papel usado fue el Whatman® No. 42, el cual para utilizarse en un ensayo se debe secar al menos 16 horas en el horno de secado. Luego se colocó el papel filtro en un desecador para enfriarlo y no haya adquirido humedad antes de usarlo.

La succión mátrica fue medida mediante el papel filtro que se encontraba en contacto directo con el espécimen de suelo; la transferencia de humedad se limita a la transferencia de vapor a través del aire dentro del contenedor de especímenes.

Para la realización de la prueba, se construyeron especímenes remoldeados con suelo alterado, reproduciendo el peso específico de la masa de suelo en estado natural (γ_m). Se colocó el espécimen remoldeado en el horno (esto se realizó para tener el espécimen completamente seco sin humedad natural), después de un tiempo de 24 horas se colocó en un recipiente de vidrio tapado. El espécimen de suelo debe prácticamente llenar el recipiente para reducir el tiempo de equilibrio y minimizar los cambios de succión en el espécimen.

Se colocaron los dos papeles filtro sobre el espécimen de suelo, aislándolo entre ellos mediante un o-ring (o cualquier elemento inerte con superficie mínima entre el papel filtro y el suelo). El papel debe de ser doblado en las orillas hacia arriba para facilitar la extracción del papel filtro en el recipiente.

Se colocó la tapa del recipiente sellándolo perfectamente. Después se colocó el recipiente sellándolo en un contenedor aislante y se colocó en un lugar con temperatura constante de 20 °C. La succión en el papel filtro y el espécimen en el recipiente se llevó a su equilibrio durante un lapso de 7 (siete) días. El equilibrio se realiza por intercambio de humedad entre el papel filtro, el suelo y el ambiente dentro del recipiente. El período de equilibrio depende de la succión inicial del suelo, humedad relativa inicial del aire, la masa de suelo y el espacio del recipiente. Un periodo de 7 (siete) días es suficiente para los periodos relacionados a la mecánica de suelos. En esta medición se debe evitar la condensación por lo que puede ser necesario un control termostático. El control de la temperatura de la prueba durante el equilibrio asegura la minimización de los efectos de condensación. Para limitar las fluctuaciones de temperatura, se utilizó una hielera de polietileno (contenedor) para almacenar los recipientes con los especímenes. (Galaviz-González, 2013)

Una vez transcurrido el periodo de equilibrio, se retiró el recipiente del contenedor; con el uso de unas pinzas, se colocó cada uno de los papeles filtro en forma independiente en contenedores metálicos. Este procedimiento se debe de completar en un tiempo de 3 a 5 segundos. La masa del contenedor metálico se determinó con una aproximación de 0.0001 g, designándola como T_c (tara fría). Se pesó la masa del recipiente con el espécimen y el papel filtro antes de someterlo a equilibrio y después del equilibrio, ésto para verificar que durante los 7 (siete) días no haya ocurrido variación de la humedad, lo cual sería indicativo de que el recipiente no quedó bien sellado.

La clave para determinaciones exitosas del contenido de agua en el papel filtro es minimizar la pérdida de agua durante las transferencias del papel filtro al recipiente con espécimen y durante la determinación de la masa del papel filtro después de la prueba.

Se colocaron las dos tapas del contenedor metálico ya con el papel filtro del espécimen y se sellaron rápidamente después de la transferencia.

Inmediatamente se determinó la masa de cada uno de los contenedores con el papel filtro M1 con una aproximación de 0.0001 g.

Se colocaron los contenedores metálicos con el papel filtro en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin sellar; esto para permitir que la humedad se escape. Los contenedores permanecieron en el horno 24 horas. Después de este tiempo, se taparon los contenedores en el horno y se dejaron reposar 15 minutos para equilibrar su temperatura. Se removió el contenedor metálico con el papel filtro del horno y se determinó la masa M2, inmediatamente se removió el papel filtro y se tomó la masa del contenedor en el que estaba el papel filtro o la masa caliente (T_h), se repitió este procedimiento para el resto de los contenedores.

Una vez que se determinaron las masas M2 y T_h , se desecha el papel filtro ya que no se debe de usar de nuevo para el desarrollo de este método de prueba.

3.4.1. Curva de Retención del Agua-Suelo (SWRC)

Partiendo de que existe un rango de Grado de Saturación (G_w) del 0% al 100% se planteó seccionar este rango en incrementos de 10% cada uno. Cabe mencionar que el G_w depende del Contenido de agua del suelo (ω).

Para la curva de humedecimiento se necesitaron 11 especímenes remoldeados secos, llevando a éstos a diferentes contenidos de agua inicial correspondientes a un Grado de Saturación requerido (G_w). Para la adición de agua a los especímenes, se necesitó la ayuda de un atomizador con el fin de dispersar agua pulverizada sobre éstos (esto para adicionar agua lentamente y de esta manera no provocar fracturas en el suelo excesivo humedecimiento). Una vez que los especímenes alcanzaron el contenido de agua requerido, se dejaron reposar durante un día para dejar estabilizar el fluido en el suelo. Finalmente, se determinaron los valores de succión (ψ) correspondientes.

Para la curva de secado, de igual manera se necesitaron 11 especímenes remoldeados secos llevando todas las muestras a un contenido de agua correspondiente al 100% de Grado de Saturación. Para el proceso anterior descrito, el agua fue adicionada de la misma manera que se realizó para el proceso de humedecimiento. La diferencia radicó en que todos los especímenes fueron llevados hasta la saturación total con ayuda de un atomizador. Se tomó un espécimen con el 100% del grado de saturación para determinar su valor de succión (ψ). Finalmente, los especímenes restantes fueron sometidos a un proceso de secado al ambiente hasta que llegaron al contenido de agua requerido para su determinación del valor de succión correspondiente.

Este procedimiento se repitió tres veces para minimizar los errores en las mediciones de este método.

3.4.2. Curva de Retención del Gasolina-Suelo (SGRC)

Se partió del mismo rango descrito para la curva de retención del suelo natural, del 0% al 100%. La gasolina que se utilizó fue Magna (verde), la cual se

obtuvo de Petróleos Mexicanos (PEMEX), gasolinera No. 4127 Universidad (Av. 5 de Febrero, Querétaro, Querétaro) con composición química C_5H_9 .

Para llevar a cabo el proceso de contaminación con gasolina de los especímenes, se partió de las muestras secadas completamente, agregando gasolina para lograr diferentes grados de saturación. Al realizar el procedimiento, se observó que en cierto grado de saturación, el suelo no retenía más gasolina, por lo que se procedió a determinar el grado máximo de saturación para la retención del hidrocarburo justo antes de la percolación.

Para la determinación del Grado de Saturación de Gasolina (G_g) en la percolación, se colocó el espécimen en un recipiente de vidrio con tapa, esto para evitar la evaporación del contaminante. El contenido de gasolina retenido fue controlado por peso hasta llegar a la percolación. Se repitió el procedimiento con tres especímenes para determinar la cantidad límite retenida por el suelo.

El contenido de gasolina retenida en peso, fue calculado como:

$$W_{ga} = \gamma_{ga} V_{ga} \quad (3-5)$$

dónde: W_{ga} = Peso de gasolina que debe ser adicionado, γ_{ga} = Peso específico de la gasolina (0.680 g/cm^3), V_{ga} = Volumen de gasolina que debe ser adicionado.

Una vez calculado la cantidad máxima de gasolina, se llevó a cabo el procedimiento para realizar la curva de humedecimiento, para ello se necesitó 5 especímenes remoldeados secos, llevando a éstos a diferentes contenidos de gasolina correspondientes al Grado de Saturación requerido (G_{ga}). Para la colocación de gasolina, con ayuda de un gotero se adicionó en los especímenes (esto para poder adicionar la cantidad de gasolina al espécimen requerido). Una vez que se obtuvieron las muestras con su contenido de gasolina respectivamente, se prosiguió a la determinación de la succión (ψ).

Para la curva de secado, se necesitaron 5 especímenes remoldeados secos llevando todas las muestras a un contenido de gasolina correspondiente al

100% de Grado de Saturación. Para el proceso anterior descrito, se adiciono la gasolina a los especímenes con ayuda de un gotero. Se tomó un espécimen correspondiente al 100% de G_{ga} para la determinación de la succión (ψ) y las demás se colocaron en el ambiente para comenzar su secado natural y de esta manera determinar la succión correspondiente a cada G_{ga} calculado para cada espécimen.

Este procedimiento se repitió dos veces para minimizar los errores en las mediciones de este método.

3.4.3. Curva de Retención del Diésel-Suelo (SDRC)

Se partió del mismo rango descrito para la curva de retención del suelo natural, del 0% al 100%. El diésel que se utilizó, se obtuvo de Petróleos Mexicanos (PEMEX), gasolinera No. 4127 Universidad (Av. 5 de Febrero, Querétaro, Querétaro).

Para llevar a cabo la prueba de contaminación con diésel de los especímenes, fueron sometidos a un proceso de secado hasta eliminar por completo su humedad natural.

Para la determinación de la cantidad de diésel retenida por el espécimen, se prosiguió a colocar éste en un recipiente de vidrio. Se colocó el contaminante en el espécimen, observando que a cierta cantidad de diésel éste percolaba. Por lo que se prosiguió a determinar el contenido de gasolina retenido hasta llegar a la percolación, el cual fue controlado por peso. Se repitió ésta prueba con tres especímenes para determinar la cantidad límite de diésel retenida por el suelo.

$$W_{di} = \gamma_{di} V_{di} \quad (3-6)$$

dónde: W_{di} = Peso de diésel que debe ser adicionado, γ_{di} = Peso específico de la diésel (0.832 g/cm³), V_{di} = Volumen de diésel que debe ser adicionado.



Figura 3-4. Determinación de la cantidad máxima de diésel retenida por el espécimen.

Una vez calculado la cantidad máxima de diésel, se llevó a cabo el procedimiento para realizar la curva de humedecimiento, para ello se necesitó 11 especímenes remoldeados secos, llevando a éstos a diferentes contenidos de diésel correspondientes al Grado de Saturación requerido (G_{di}). Para la colocación de diésel, con ayuda de un gotero se adicionó en los especímenes (esto para poder adicionar la cantidad de diésel al espécimen requerido). Se dejaron reposar durante un día, esto con la finalidad de que el fluido se estabilizara. Una vez que se obtuvieron las muestras con su contenido de diésel respectivamente, se prosiguió a la determinación de la succión (ψ).

Para la curva de secado, de forma similar se necesitaron 11 especímenes remoldeados secos llevando todas las muestras a un contenido de diésel correspondiente al 100% de Grado de Saturación. Para el proceso anterior descrito, de igual manera se adiciono el diésel a los especímenes con ayuda de un gotero. Se tomó un espécimen correspondiente al 100% de G_{di} para la determinación de la succión (ψ) y las demás se colocaron en el ambiente para comenzar su secado natural. Los especímenes no se secaron a temperatura ambiente, por lo que fueron sometidos a un proceso de secado al horno, con el fin de llevar a los especímenes al peso requerido (contenido de diésel) para

posteriormente determinar su valor de succión correspondiente calculado a cada espécimen.

Este procedimiento se repitió dos veces para minimizar los errores en las mediciones de este método. La tabla 3-1, muestra un resumen del tipo de pruebas que se realizaron así como también, la cantidad de pruebas, tiempo y Norma que se aplicó a cada prueba.

Tabla 3-1. Resumen de pruebas de laboratorio realizadas.

Caracterización del suelo					
Tipo de prueba		Cantidad	Tiempo (días)	Norma vigente	
Muestreo del suelo (muestra alterada)		1	1	NMX-C431-ONNCCE-2002	
Determinación de humedad		1	2	ASTM D 2216-10	
Densidad relativa		1	2	ASTM D-854-10	
Análisis granulométrico vía seca		1	2	ASTM D-2487-06	
Análisis granulométrico vía húmeda		1	7	ASTM D-422-07	
Límites de Atterberg		1	2	ASTM D-4318-10	
Peso específico		1	1	ASTM D-4531-92	
Caracterización del suelo contaminado					
Límites de Atterberg		1	2	ASTM D-4318-10	
Curvas de Retención					
Curva de Retención Agua-Suelo	Humedecimiento	Remoldeo húmedo (espécimen)	40	4	
		Proceso de humedecimiento completo	33	5 a 10	
		Prueba de papel filtro	33	7	ASTM D-5298-03
		Secado de la muestra después de la prueba	33	1	
	Secado	Remoldeo seco (espécimen)	40	4	
		Proceso de secado	33	15 a 20	
		Prueba de papel filtro	33	7	ASTM D-5298-03
		Secado de la muestra después de la prueba	33	1	
Retención Gas	Remoldeo de espécimen	10	1		

		Proceso de humedecimiento	10	1	
		Prueba de papel filtro	10	7	ASTM D-5298-03
		Secado de la muestra después de la prueba	10	1	
	Secado	Remoldeo de espécimen	10	1	
		Proceso de secado	10	1-2	
		Prueba de papel filtro	10	7	ASTM D-5298-03
		Secado de la muestra después de la prueba	10	1	
	Curva de Retención Diésel-Suelo	Humedecimiento	Remoldeo de espécimen	25	3
Proceso de humedecimiento			22	2	
Prueba de papel filtro			22	7	ASTM D-5298-03
Secado de la muestra después de la prueba			22	2	
Secado		Remoldeo de espécimen	25	3	
		Proceso de secado	22	3-5	
		Prueba de papel filtro	22	7	ASTM D-5298-03
		Secado de la muestra después de la prueba	22	2	

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización Geotécnica

Para llevar a cabo esta investigación, se obtuvieron muestras alteradas de un predio ubicado en el fraccionamiento Santa Fe, perteneciente al municipio de Corregidora, Querétaro. Dichas muestras se extrajeron en el mes de Septiembre. Posteriormente se realizaron las pruebas correspondientes. Los cálculos y resultados de cada prueba se muestran en el ANEXO A. La tabla 4-1, muestra un resumen de la caracterización del suelo, con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS) se deduce que se trata de un suelo arcilloso de alta compresibilidad (CH).

Tabla 4-1. Caracterización Geotécnica del fraccionamiento Santa Fe, Querétaro.

Propiedad	Símbolo	Natural	Gasolina	Diésel
Humedad Gravimétrica	ω		24.35%	
Peso Específico de la masa de suelo	γ_m		14.00 kN/m ³	
Gravedad Específica	Ss		2.56	
Relación de vacíos	e		1.14	
Porosidad	n		0.57	
Grado de Saturación	G ω		48.70 %	
Límite Líquido	LL	87.16 %	NP	27.57%
Límite Plástico	LP	51.61 %	NP	NP
Índice Plástico	IP	35.54 %	NP	NP
Límite de Contracción	LC	16.08 %	NP	NP
Contracción lineal	CL	21.25 %	NP	NP
Contenido de Grava	G		0.25 %	
Contenido de Arena	S		4.24 %	
Contenido de Suelo Fino	F		95.51 %	
Clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	SUCS	CH	-	ML

*NP: no presenta

Se tiene como referencia que el suelo del fraccionamiento Santa Fe es un suelo expansivo (arcilloso), del cual se determinó la actividad del suelo dando como resultado 0.63 como valor de actividad de la arcilla según el criterio de Snethen (1986), lo que significa que dicho material se cataloga como una arcilla relativamente inactiva desde el punto de vista del comportamiento expansivo. Sin embargo, el material no se considera bueno ya que por ser una arcilla muy

compresible está sujeta a que toda construcción desplantada en este suelo sufra importantes asentamientos.

4.1.1. Límites de consistencia del suelo contaminado con gasolina

El límite líquido del suelo contaminado con gasolina no fue posible determinarlo con el proceso de prueba de la Copa de Casagrande ni con el Cono Inglés, debido a que el suelo contaminado originó una apariencia diferente con fragmentos de suelo rígido, esto provocó dificultad para batir el material contaminado sobre el dispositivo de medición. (Figura 4-1).



Figura 4-1. Suelo contaminado con gasolina.

Esta observación difiere ya que el suelo en estudio tiene 56.24% de arcilla, 39.27% de limos y 4.24% de arenas (ver anexo A.4). En comparación con los resultados presentados por Martínez & López (2001) quienes mencionaron que la textura de un suelo contaminado con gasolina y con características: suelo fino (57.50% de arcilla y 35.75% de limos) y 6.74% de arenas no se ve afectada.

4.1.2. Límites de consistencia del suelo contaminado con diésel

Para la determinación del límite líquido (LL) del suelo contaminado, se usó el método del Cono Inglés ya que con la Copa de Casagrande no fue posible

determinarlo. Para el suelo contaminado con diésel, el límite líquido fue de 27.57%.

Con la adición de diésel, el suelo sufre un cambio de apariencia y se ve reflejado en su límite líquido; ya que en comparación con el suelo natural, éste al estar contaminado el límite líquido se redujo, pasando de un comportamiento plástico a un comportamiento no plástico al momento de la aplicación del contaminante.

En cuanto a la determinación del límite plástico y de contracción, no fue posible obtenerlos, ya que el comportamiento del suelo con el contaminante (diésel) tenía la apariencia limosa no plástica, es decir, sin cohesión entre las partículas. Dicho comportamiento provocó que no se lograran formar los rollitos durante el proceso de amasado. Debido a lo anterior, el suelo con el diésel mostró un límite de contracción nulo (ver Figura 4-3).



Figura 4-2. Ausencia de la contracción lineal y del límite de contracción del suelo contaminado con diésel.

El diésel actúa como lubricante sobre las partículas disminuyendo la cohesión hasta que éste se comporta como un material limoso. Esta observación difiere, con los resultados presentados por Martínez & López (2001) quienes

mencionaron que en el suelo contaminado con diésel, se producen cambios ligeros en el contenido de arcillas y arenas, sin llegar a modificar su textura.

4.2.

4.3. Curva de Retención Agua-Suelo

Con la curva de retención del Agua-Suelo se puede tener conocimiento de las propiedades hidráulicas y mecánicas del suelo, debido a cambios de succión. La Curva de Retención Agua-Suelo (SWRC) se compone de la relación entre la Succión (ψ) y el Grado de Saturación ($G\omega$) del suelo, por consiguiente es necesario analizar la respuesta hidro-geotécnica de los suelos no saturados.

Aunado a lo anterior, se realizaron tres determinaciones por el método del papel filtro. La Figura 4-4, 4-5 y 4-6, muestran el comportamiento de la succión del suelo con distintos fluidos en su matriz sólida, es decir, la relación de la succión con el agua, con la gasolina y con el diésel.

En la Figura 4-4, se evidencia el fenómeno de histéresis formado por las trayectorias principales de humedecimiento y sacado. Además, se observa que la succión mínima y máxima se encuentra en el orden de 500 kPa y 170,000 kPa, respectivamente.

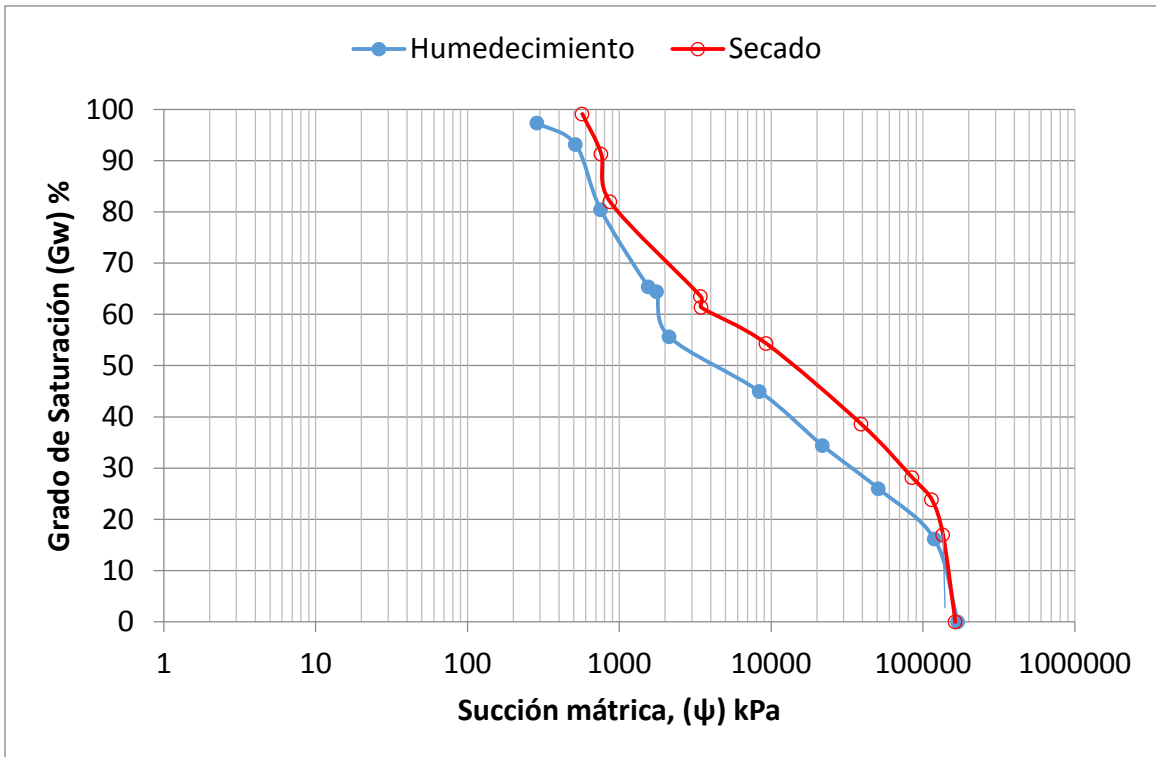


Figura 4-3. Curva de Retención de Agua- Suelo (succión vs grado de saturación).

4.4. Curva de Retención Gasolina-Suelo

De acuerdo al concepto de succión descrito anteriormente, se determinaron las Curvas de Retención del suelo contaminado con gasolina.

De la prueba de contaminación del suelo con gasolina, se realizó un proceso de contaminación a tres especímenes de 31.00 g en promedio, de las cuales se obtuvo un porcentaje promedio de retención de contaminante de 13.11%. Por ende, un 13.11% de contenido de gasolina fue considerado como el 100% de grado de saturación con gasolina (G_{ga}). Finalmente, se estableció que un 3.28% de contenido de gasolina correspondía a un 25% en el grado de saturación con gasolina. Se determinó una concentración de contaminante (gasolina) de 0.13 g/gr suelo.

A continuación se muestran los resultados obtenidos. En la figura 4-5, se muestra la Curva de Retención Gasolina-Suelo, que nuevamente se evidencia el

fenómeno de histéresis característico entre las curvas principales de humedecimiento y secado. Además, se observa que la succión máxima se encuentra en 160,000 kPa y la succión mínima de 50,000 kPa para la trayectoria de humedecimiento. Por otro lado, los valores de succión en la trayectoria de secado oscilan entre 30,000 y 170,000 kPa. Adicionalmente, se aprecia que el valor de succión (ψ) es el mismo para un rango de Grado de saturación (G_{ga}) de 0% a 56% en el ciclo de secado y de 0% a 41% en el ciclo de humedecimiento.

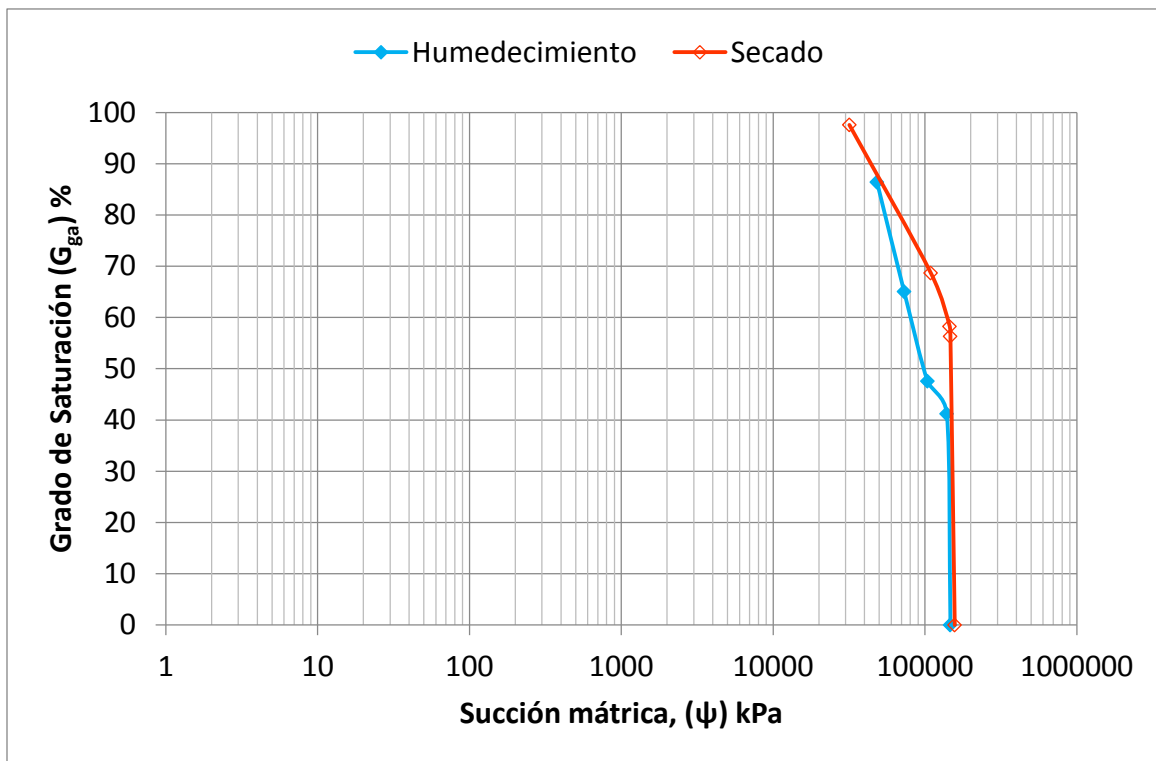


Figura 4-4. Curva de Retención de Gasolina- Suelo (succión vs grado de saturación con gasolina).

Un aspecto importante de resaltar al momento de agregar el contaminante (gasolina) al suelo, es que éste fluía solo por la superficie externa del espécimen, debido a que se genera una fase continua del fluido que se manifiesta como un incremento en la permeabilidad superficial, debido a la búsqueda de equilibrio entre las fuerzas de adsorción de la arcilla y el potencial de atracción de la

gasolina, teniendo además, un efecto de disminución en la permeabilidad hacia el interior del suelo; ya que se usó suelo completamente seco.

4.5. Curva de Retención Diésel-Suelo

De la prueba de contaminación de diésel en el suelo, se contaminaron tres especímenes de 30.00 gr en promedio, de las cuales se obtuvo un porcentaje promedio de 31.49% de contaminante retenido. Por lo tanto, un 31.49% de contenido de diésel fue considerado como el 100% de grado de saturación con diésel (G_{di}). Finalmente, se estableció que un 3.15% de contenido de diésel correspondía a un 10% en el grado de saturación con diésel. Se determinó una concentración de contaminante (diésel) de 0.31 g/gr suelo.

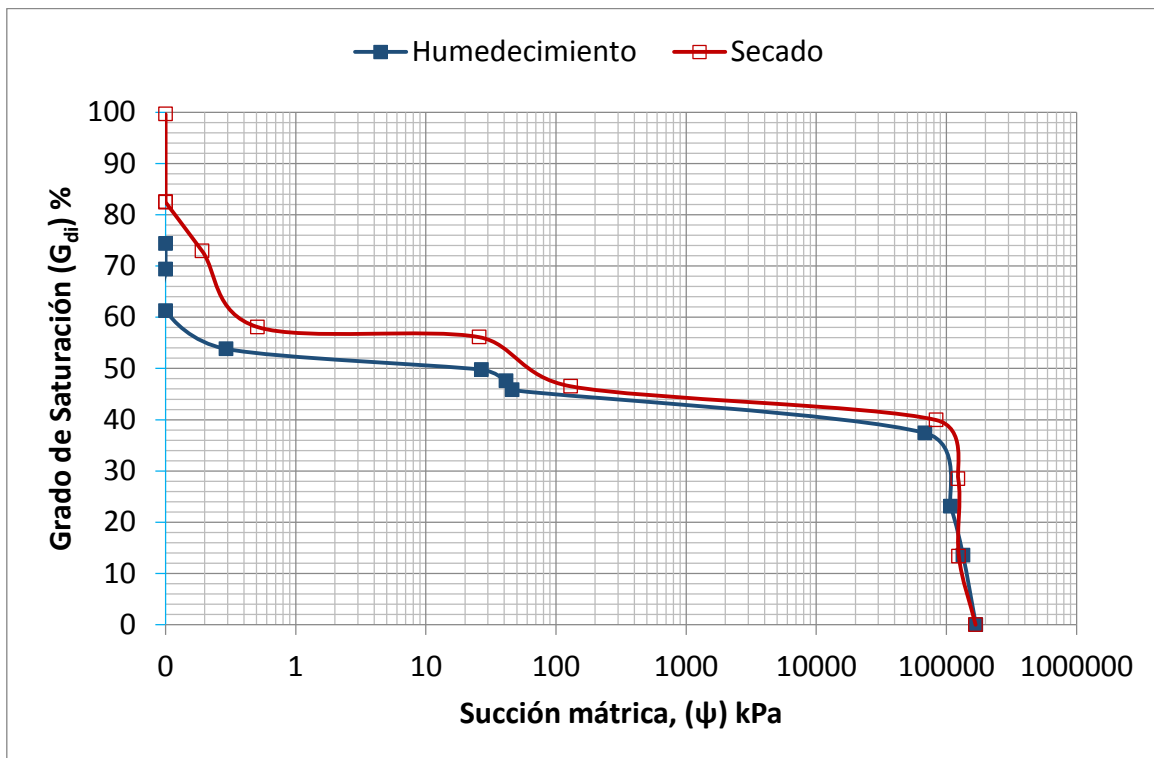


Figura 4-5. Curva de Retención de Diésel- Suelo (succión vs grado de saturación).

La Figura 4-5 muestra que el comportamiento del suelo contaminado con diésel, en la cual se observa en los grados de saturación del 0% al 40%, los valores de succión no cambian significativamente. Sin embargo, a partir del 40%

hasta el 100% de grado de saturación con diésel los valores de succión decrecen súbitamente hasta ser casi nulos. Asimismo, se aprecia el fenómeno de histéresis entre las trayectorias principales y también se observa que la succión máxima se encuentra en 170,000 kPa y la succión mínima en 0 kPa.

El llenado de los espacios entre las láminas del suelo con un fluido se hace por capas que se llenan al mismo tiempo. Por ende, de un 0% hasta un 40% de G_{di} se mantienen los valores de succión prácticamente altos (constantes) y a partir del $G_{di} = 40\%$ se inicia la disminución de la succión hasta alcanzar un punto mínimo en el $G_{di} = 60\%$. Lo anterior se debe a que posterior a este grado de saturación, las fuerzas de atracción están satisfechas; es por ello, que la succión se hace nula.

4.6. Comparación de las Curvas de Retención del Suelo

La Figura 4-6, muestra una comparativa entre las Curvas de Retención Agua-Suelo (SWRC), Gasolina-Suelo (SGRC) y Diésel-Suelo (SDRC), respectivamente. En ellas se puede observar que el suelo tiene mayor capacidad de retención con el agua en comparación con la gasolina y el diésel. La SGRC se mueve hacia las arcillas rígidas, mientras que la SDRC se traslada hacia los limos no plásticos.

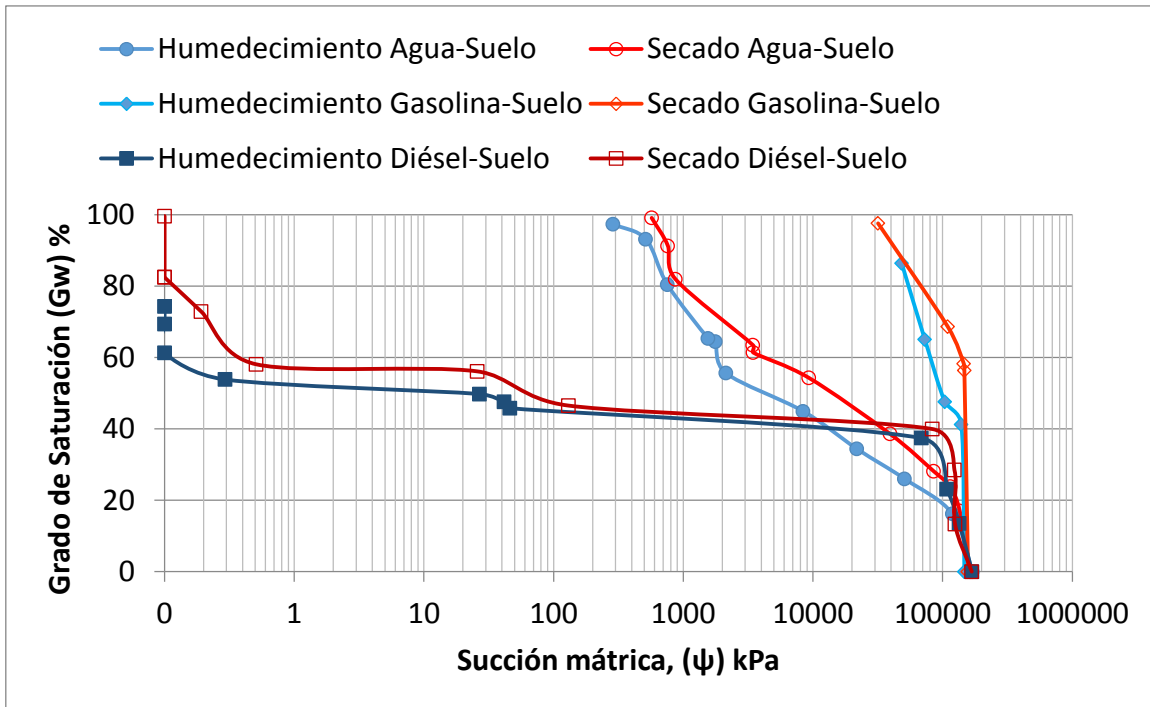


Figura 4-6. Comparativa de Curvas de Retención del Suelo.

La Figura 4-7 muestra una comparativa entre la Curva de Retención del Agua (SWRC) y la Curva de Retención Diésel-Suelo (SDRC) con suelo en estado seco obtenidas en el estudio, contra la Curva de Retención del Diésel con suelo en estado húmedo de la investigación realizada por Antonio (2014), ambas determinadas a partir de la utilización del mismo suelo arcilloso. Se observó que al momento de considerar una combinación de agua y contaminante (gasolina y diésel) en la fase líquida y que ser adicionada al espécimen de suelo, el agua desplaza al contaminante para adherirse a las partículas sólidas del suelo. Además, el comportamiento de la Curva de Retención (SWDR) de Antonio (2014) es más similar a la Curva del Suelo (SWRC) natural. Lo anterior coincide con lo que manifestaron Smith *et al.* (2003), donde evidenciaron que la permeabilidad del fluido contaminante disminuye conforme se incrementa el contenido del agua en el suelo, es decir, debido a que el agua está desplazando al contaminante, la velocidad del flujo de este último se ve disminuida y como consecuencia, la permeabilidad del agua se incrementa.

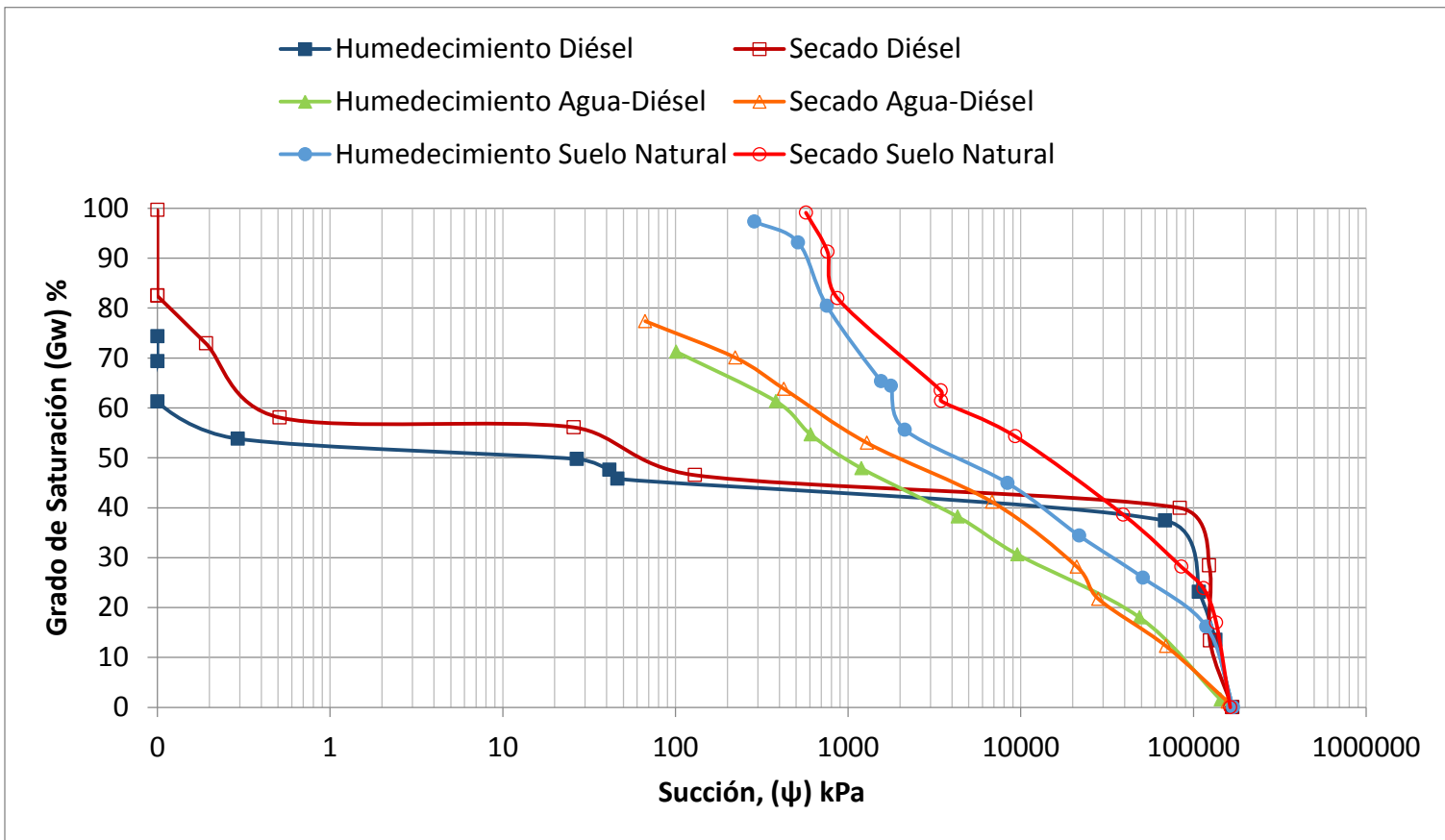


Figura 4-7. Comparativa de Curvas de Retención Diésel-Suelo.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La hipótesis se cumplió ya que las propiedades de plasticidad sí se ven afectadas, como ya se mencionó en esta investigación, ante la presencia de los hidrocarburos, en este caso, gasolina y diésel, así como también la capacidad de retención del fluido en el suelo. Tras analizar el comportamiento de las propiedades índice del suelo ante la presencia de estos hidrocarburos, se observaron cambios significativos. El suelo arcilloso en estado natural, presentó un límite líquido de 87.16% y un índice plástico de 35.54%, lo cual condujo a una clasificación del suelo como arcilla de alta compresibilidad (CH) según el sistema SUCS. Por otro lado, el suelo con gasolina no fue posible determinar los límites de consistencia, por ende, el suelo no se pudo clasificar. En cambio, con el diésel se obtuvo un límite líquido de 27.57% y no presentó un índice plástico, lo que condujo a una clasificación del suelo como un limo de baja compresibilidad (ML).

El suelo en combinación con la gasolina provocó que su consistencia fuera extremadamente rígida, a tal grado de no permitir la determinación de los límites de consistencia. Por esta razón no fue posible determinar las propiedades índice del suelo contaminado con la gasolina. A diferencia del suelo contaminado con gasolina, el contaminado con diésel pierde propiedad de plasticidad y además se pudo medir dicha variación, provocando un cambio en su clasificación a un material limoso no plástico.

Mediante el análisis comparativo del comportamiento de las Curvas de Retención del suelo en estado natural como en estado contaminado con los hidrocarburos, se observó que en la SDRC y SGRC, la presencia de agua en el ambiente ya sea en forma de vapor o líquido, evidencia que el potencial de atracción entre el suelo y el agua es mayor en comparación con los hidrocarburos.

Adicionalmente, se observó que las Curvas de Retención de los suelos contaminados SGRC y SDRC sufrieron un desplazamiento respecto a la Curva de Retención del Agua SWRC, es decir, la SGRC se mueve hacia el rango de las arcillas rígidas, ya que con altos grados de saturación con gasolina (G_{ga}) se

mantienen los valores de succión altos, debido a que la gasolina se mantiene en la superficie del espécimen, lo cual propicia que los valores de succión medidos correspondan a los del suelo con agua adsorbida y no con los del contaminante. Por otra parte, la SDRC sufre un desfase hacia el rango de los limos no plásticos, es decir, que desde el 40% hasta el 100% de grado de saturación con diésel, los valores de succión decrecen súbitamente hasta ser muy bajos.

En cuanto a la curva de retención SWRC y la curva de retención SGRC, existió una relación ya que las succiones se incrementan con el aumento del contenido del líquido. En cambio con el diésel no se pudo realizar la relación con la curva de retención del agua, ya que a altos contenidos de contaminante diésel, las succiones se ven disminuidas. Esto nos permite concluir que la curva de calibración del papel filtro obtenida para el agua no puede ser utilizada para la estimación de la succión con otros líquidos.

Dado el cambio en el comportamiento que se observa en las curvas de retención de los suelos contaminados, es de esperarse que las propiedades mecánicas de los suelos que actúan como soporte se vean favorables de acuerdo a la cantidad de hidrocarburo usado en esta investigación. Por lo anterior, las edificaciones construidas con o sobre este tipo de suelos podrán no sufrir daños estructurales.

Aunado a todo lo anterior, se concluye que el suelo tiene mayor capacidad de retención con el agua, en comparación con los dos fluidos; gasolina y diésel, la gasolina es la que muestra la menor capacidad de retención.

Así como también, se sugiere que en proyectos de investigación futuros se trabaje con curvas de calibración para papel filtro, considerando líquidos distintos al agua. Además de realizar estudios sobre el comportamiento del suelo en presencia de hidrocarburos totales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acebedo, D., 2012. Uso de métodos directo e indirecto en la caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Álvarez-Manilla, A. A., Martínez, G. E. I. P., Flores, M. A. P. y Gamica, P. A., 2002. Metodología para saneamiento de acuíferos profundo por derrame de hidrocarburos. Publicación técnica No. 196. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes,
- Antonio, Y., 2014. Evaluación del impacto de la contaminación con diésel en las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- ASTM D2216-10. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture).
- ASTM D2487-06. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM D422-63, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM D4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM D4531-92, 2008. Standard Test Methods for Bulk Density of Peat and Peat Products.
- ASTM D5298-10, 2010. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction). Using Filter Paper.
- ASTM D854-10, 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- Ayala, T. I., 2008. Influencia del potencial de expansión en la predicción de asentamientos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bedair, H. M. and Al-Saad, H. T., 1992. Dissolved and Particulate of Adsorbed Hydrocarbons in Water of Shatt Al-Arab River. Water, Air, Soil Pollution. 61: 397-408.

- Bidleman, T. F., Castleberry, A. A., Foreman, W. T., Zaransk, M. T. and Wall, D. W., 1990. Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Studies in the Southeastern United States. *Est. Coast Shelf Science*. p. 91.
- Braja, M. D., 2001. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Internacional Thomson Editores, S.A. de C.V.
- Burns, R., 2003. *Fundamentos de Química (4a. Ed.)*. México, México.
- Chappin, R. G. and Summerlin, L. R., 1988. *Química*. Publicaciones Cultural, México.
- Crespo, C., 1979. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones (1era. Ed.)*. México Limusa S.A..
- Croney, D. and Coleman, J. D., 1948. Soil Thermodynamic Applied to the Movement of Moisture in Road Foundations. In *Proc. 7th Int. Cong. Appl. Mech.* 3: 163-177.
- Croney, D., Coleman, J. D. and Lewis, W. A., 1950. Calculation of the Moisture Distribution Beneath Structures. *Cov, Eng. L.* 45: 524.
- Edlefsen, N. E. and Anderson, A. B., 1943. Improved Apparatus for Soil Moisture. *Hilgardia*. 15: 31-298.
- Ellis, R. and Adams, R. S., 1960. Contamination of soils by petroleum hydrocarbons. *Soil Sci. Soc. Am.* 26: 197-216. Kansas State University, Manhattan.
- Fredlund, D. G. y Rahardjo, H., 1993. *Mecánica de Suelos para Suelos no Saturados*.
- Fredlund, D. G. and Xing, A., 1994. Equation for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* 31. 3:521-532.
- Galaviz-González, J. R., 2013. *Predicción de asentamientos de cimentaciones superficiales mediante análisis de intreracción suelo expansivo-estructura de cimentación*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Han-Chen, H., Yih-Chi, T., Chen-Wuing, L. and Chu-Hui, C., 2005. A novel hysteresis model in unsaturated soil. *Hydrol. Process.* 19: 1653-1665.
- Hayden, N. J., Voice, T. C. and Wallace, R. B., 1997. Residual gasoline saturation in unsaturated soil with and without organic matter. *J. Contam. Hydrol.* 25: 271-281.

- Hoag, G. and Marley, M., 1986. Gasoline Residual Saturation in Unsaturated Uniform Aquifer Materials. *J. Environ. Eng.* 112: 586-604.
- Horta, J., Rojas, E., Pérez-Rea, M. L., López-Lara, T., and Zaragoza, J.B., 2012. A random solid-porous model to simulate the retention curves of soils. *Int. J. Numer. Anal. Met.* 37: 932-944.
- Iphorski, M., 2011. Una mirada al microscopio electrónico de barrido. *Materiales.* p. 52.
- Izdebska-Mucha, D. and Trzcinski, J., 2008. Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *Geologija Supplement.* 50: 68-74.
- Jacott, M., Arias, J. M., Ireta, G. H. and Franco, A., 2011. Impactos de la actividad petrolera en la salud humana y el ambiente. *Proyecto México Tóxico: Etapa Tabasco. Fronteras comunes y Asociación Ecológica Santo Tomás.*
- Karimi-Lotfad, S., Pickard, M. A. and Gray, M. R., 1996. Reactions of polynuclear aromatic hydrocarbons in soil. *Environ. Sci. Technol.* 30: 1145-1151.
- Kessler, A. and Rubin, H., 1987. Relationships between water infiltration and oil spill migration in sandy soils. *J. Hydrol.* 91: 187-204.
- Lee, H. C. and Wray, W. K., 1992. Evaluation of Soil Suction Instruments. *Proc. 7th Int. Conf. on Expansive Soils (Dallas, Texas).* 1: 307-312.
- Li, L. Y., 2006. Retention capacity and environmental mobility of Pb in soil along highway corridor. *Water, Air and soil Pollution.* 170: 211-227.
- Lo, I. and Hu, L., 2004. Migration of Light Nonaqueous-Phase Liquids in Two Unsaturated Soils: Clayey Silt and Fine Sand. *Pract. Period Hazard Toxic Radioact Waste Manage.* 8: 228-237.
- Lu, N. and Likos, W. J., 2004. *Unsaturated soils mechanics.* Wiley, Hoboken, NJ.
- Macías, F., 1993. *Contaminación de suelos.* p. 53.
- Martínez, V. E. y López, F., 2001. Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra* 19: 9-17.
- Menzie, C. A., Potocki, B. B. and Santodonato, J., 1992. Exposure to Carcinogenic Polycyclic Hydrocarbons in the Environment. *Environ. Sci. Technol. Issue* 26: 1278-1284.

- Meza, A., 2012. Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra, Medellín Colombia*. 31: 23-28.
- Nazir, A. K., 2011. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alexandria Eng. J.* 50: 331-335.
- Olivera, R. E. V. y Rodríguez, A. C., 2005. Estudio del riesgo en ductos de transporte de diésel y gasolina en México. *Científica*. 9: 159-165.
- Ortínez, B. O., Lema, I. I. y Gavilán, G. A., 2003. La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta Ecológica*. Instituto Nacional de Ecología. p 83.
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. y Villar, S., 2007. Técnicas de recuperación de suelos.
- Padilla, R. M., 1989. Determinación de los niveles de hidrocarburos en sedimentos recientes del río Calzadas en la región del Bajo río Coatzacoalcos, Veracruz. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Pardo, J. M. y Salinas, L. M., 2004. Curva de Retención del Suelo (SWRC): Análisis de estimaciones y ajustes. *Física, Química y Biología de Suelos*. p. 14.
- Parr, J. F., Papendick, R. I., Homick, S. B. and Meyer, R. E., 1992. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Alter. Agr.* 7: 5-11.
- PEMEX, 1988. El petróleo. Gerencia de Información y Relaciones Públicas PEMEX. México.
- Pignatello, J. J. and Xing, B., 1996. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. *Environ. Sci. Technol.* 30: 1-11.
- Plice, M. J., 1948. Some effects of crude petroleum on soil fertility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 14: 413-416.
- Pliego, M., 2012. Dinámica de la penetración capilar en estructuras complejas. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Pons-Jiménez, M., Querrero-Peña, A., Azavala-Cruz, J. y Alarcón, A., 2011. Extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en suelos con características físicas y químicas diferentes. *Universidad y ciencia*. 27: 1-15.

- Rahman, Z. A., Hamzah, U. and Binti, N. A., 2011. Engineering geological properties of oil contaminated granitic and metasedimentary soils. *Am. J. Appl. Sci.* 7: 954-961.
- Richards, B. G., 1965. Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychometric Technique Using Thermistors. In *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, p. 39.
- Rojas, E. and Chávez, O., 2013. Volumetric behavior of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 50: 209-222.
- Roland, 2015. How a subsidence insurance can save your home. [Online] Available at: <http://www.swisscheeseandbullets.com/how-a-subsidence-insurance-can-save-your-home/>
- Romero-Freire, A., Martín-Peinado, F. J. and Van Gestel, C. A. M., 2015. Effect of soil properties on the toxicity of guideline values. *J. Hazard. Mater.* 289: 46-53.
- Romo, D. R., Escamilla, J. C. C. y Ortiz, A. U., 2011. El transporte de ductos en PEMEX los retos en los inicios de la segunda década del siglo XXI. *Eseconomía. Revista de estudios económicos.* p. 25.
- Sabroso, M. C. y Pastor, A., 2004. Guía sobre suelos contaminados. [En línea] Available at: http://www.conectapyme.com/files/medio/guía_suelos_contaminados.pdf.
- Saval, B. S., 1995. Acciones para la remediación de suelos en México. En *memorias del Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo*. Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- Saval, S. y Lesser, J. M., 2000. Una experiencia de caracterización y remediación de un suelo arcilloso contaminado con hidrocarburos. *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales AIDIS. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: memorias técnicas.* p. 1-7. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, 12, Morelia.
- Schofield, R., 1935. The pF of the water in soil. *Trans. 3rd Int. Congress Soil Sci.* 2: 37-48.
- SEMARNAT, 1996. *Los suelos de Tabasco. Restauración, conservación y uso.* Gobierno Institucional del Estado de Tabasco.

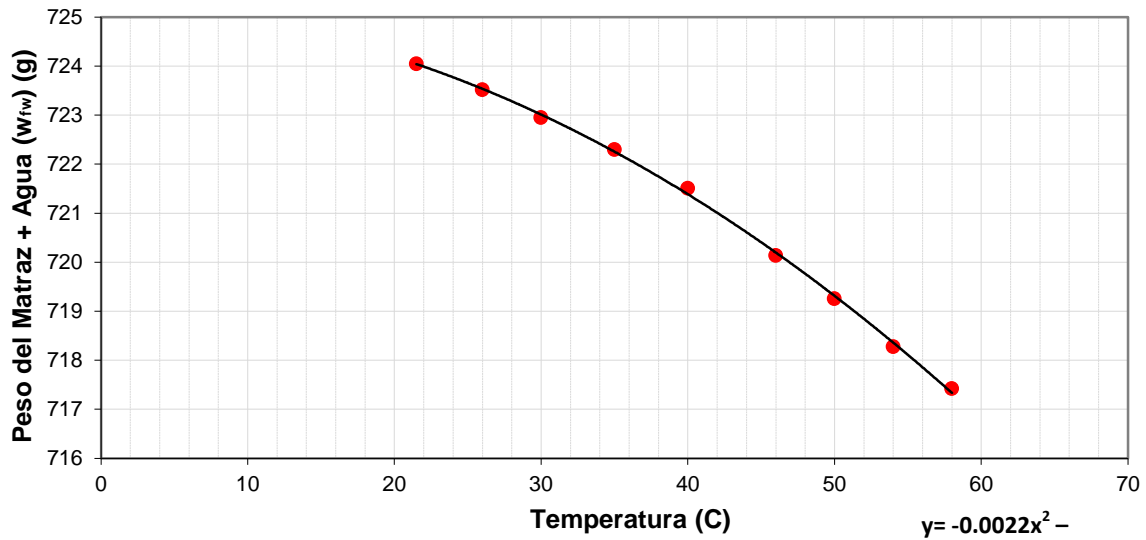
- Smith, J. A., Bartelt-Hunt, S. L. and Burns, S. E., 2003. Sorption and permeability of gasoline hydrocarbons in organobentonite porous media. *J. Hazard. Mater.* p. 91.
- Snethen, D. R., 1986. Expansive Soils: where are we?. *Nat. Res. Council Comm. on Ground Failure Hazards*, Issue 3. p.12.
- Torres-García, J. J. y Pérez-Rea, M. L., 2010. Recomendaciones geotécnicas en la planeación de muestreos ambientales de sitios contaminados por hidrocarburos. XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.
- Ugwoha, E. and Andresen, J. M., 2014. Sorption and phase distribution of ethanol and butanol blended gasoline vapours un the vadose zone after release. *J. Environ. Sci.* 26: 608-616.
- Van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892:898.
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S. and Buisson, M. S., 2003. Coupling of Hidraulic Hysteresis and Stress-Strain Behaviour in Unsaturated soils. *Geotechnique.* 53: 41-54.
- Yong, R. N., Mohammed, L. F. and Mohammed, A. O. M., 1994. Retention and transport of soil residue in sandy loam soil. *Analysis of Soils Contaminated with Petroleum Constituents 1221*. ASTM publication. p. 98-100.

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

A.1. Densidad Relativa de los Sólidos.

CALIBRACIÓN DEL MATRAZ 1									
Registro de Lecturas Promedio									
Temperatura (°C)	8	4	0	6	0	5	0	6	1.5
Peso Matraz (gr)	17.42	18.28	19.26	20.14	21.51	22.30	22.95	23.52	24.05

Curva de Calibración del Matraz 1



DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA										
Datos de la Muestra							Ecuación Curva Calibración			
lane	flanera (g)	flan+ms (g)	s (g)	c (°C)	fsw (g)	fw (g)				s
	17.99	67.99	0.00	3.5	00.89	72.13	.0028	.0309	78.49	.56

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fsw} + W_s - W_{fsw}}$$

Ecuación Curva de

$y = ax^2 + bx + c$

S_s = Peso Específico Relativo de los Sólidos del Material
 W_s = Peso del Material Seco Secado al Horno (gr)

- W_{fw} = Peso del Matraz lleno con agua a la Temperatura t_c determinada gráficamente de la curva de calibración del Matraz (gr)
- W_{fsw} = Peso del Matraz conteniendo al suelo y el agua hasta la marca de aforo, a la temperatura de prueba t_c (gr)
- t_p = Temperatura de prueba tomada cuando el matraz está aforado con agua y el suelo ($^{\circ}\text{C}$)

A.2. Peso Específico de la Masa de Suelo (γ_m).

POR INMERSIÓN EN AGUA Y PARAFINA										
Registro de Lecturas										
W_m	W_{m+p}	W_{m+p}'	γ_p	γ_o	W_p	V_p	V_m	γ_m	γ_m	γ_m
(gr)	(cm)	(cm)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(cm)	(cm ³)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(kg/m ³)	(ton/m ³)
327.01	368.84	128.25	0.96	1.00	41.83	43.57	197.02	1.400	1400	1.400
Testigo de Humedad										
Flanera	W_f	W_f+W_m	W_f+W_s	W_m	W_s	ω				
No.	(cm)	(cm)	(cm)	(cm ³)	(gr/cm ³)	(%)				
2	119.31	194.99	179.88	75.68	60.57	24.35				

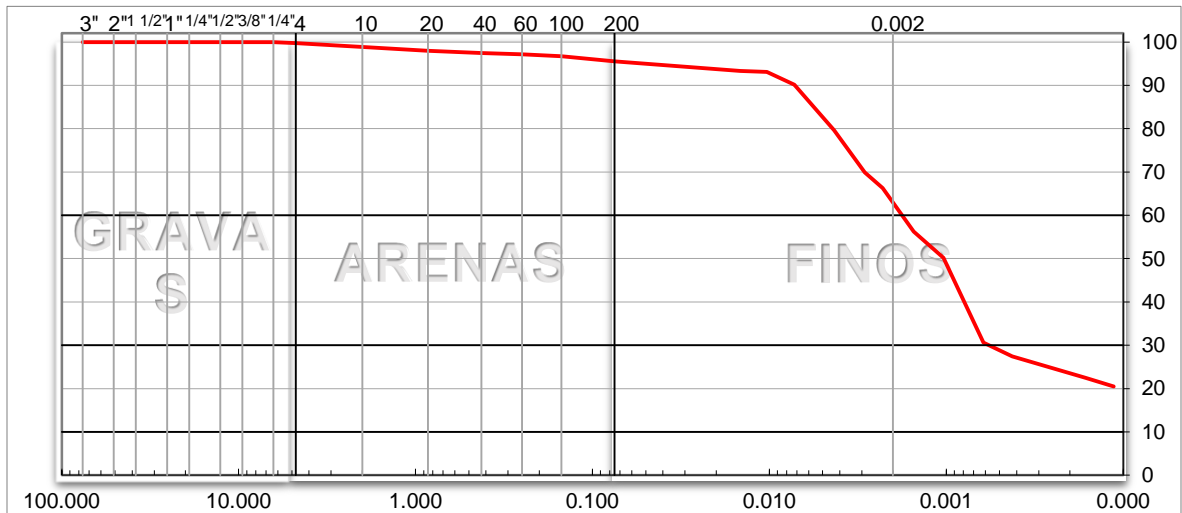
A.3. Relaciones Volumétricas y Gravimétricas.

RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS					
Registro de Lecturas					
ω	Ss	γ_m	γ_o	W_s (gr)	γ_d
(%)		(gr/cm ³)	(gr/cm ³)		(gr/cm ³)
24.35	2.56	1.400	1.000	60.57	1.13
W_w	W_m	V_s	V_w	V_a	V_v
(gr)	(gr)	(cm ³)	(cm ³)	(cm ³)	(cm ³)
14.75	75.32	23.66	14.75	15.39	30.14
V_m	e	G_w	n	θ	
(cm ³)		(%)	(%)	(%)	
53.80	1.27	48.70	0.56	27.41	

A.4. Granulometría vía mallas (Curva Granulométrica).

DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA No.4					
Peso Char	0.0	Char et4	0.0	Peso ret4	0.0
Malla No.	Abertura en mm.	Peso (g) retenido	% retenido	% ret. acum.	% pasa acum.
3"	76.20	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	50.80	0.0	0.0	0.0	100.0
1 ½"	38.10	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.40	0.0	0.0	0.0	100.0
¾"	19.05	0.0	0.0	0.0	100.0
½"	12.70	0.0	0.0	0.0	100.0
⅜"	9.53	0.0	0.0	0.0	100.0
¼"	6.35	0.0	0.0	0.0	100.0
No.4	4.75	0.81	0.3	0.3	99.7
Pasa No.4		296.8			
Total		319.2			

DEL MATERIAL QUE PASA LA MALLA No.4 (LAVADO)					
Peso Char		Char+pas4	318.4	Peso pas4	318.4
Malla No.	Abertura en mm.	Peso (g) retenido	% retenido	% ret. acum.	% pasa acum.
Testigo Húmedo		296.8			Testigo Seco 296.8
Contenido Humedad		0.01			Total pasa No.4 Corr. 318.4
10	2.000	2.680	0.90	1.15	98.85
20	0.850	2.580	0.87	2.02	97.98
40	0.425	1.540	0.52	2.54	97.46
60	0.250	1.000	0.34	2.88	97.12
100	0.150	1.170	0.39	3.27	96.73
200	0.075	3.630	1.22	4.49	95.51
Pasa No.200		284.16	95.51	100.00	0.00
SUMA		296.8			
GRAVAS	0.25	ARENAS	4.24	FINOS	95.51



A.5. Granulometría vía Hidrómetro.

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA VÍA HIDRÓMETRO														
CORRECCIONES														
Lect. Superior c/defloculante:	4.0	Lectura Superior :	-	0.5	%	Finos :	95.51	W _s :	50.0					
Lect. Inferior c/defloculante:	5.0	Lectura Inferior :	0.5	0.5	S _s :	2.56	V _p :	300.0						
Corrección Defloculante (C _d):	4.5	Corrección Menisco (C _m) :	1.0	1.0	α :	1.03	d _p :	10.167						
CALIBRACIÓN DEL HIDRÓMETRO														
Lectura	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)	V _b (cm ³)	A _b (cm ²)	L (cm)									
-1 -60	9.926	15.873	60	29.51	16.846									
10-60	6.933	15.873	60	29.51	13.853									
20-60	5.490	15.873	60	29.51	12.410									
30-60	4.116	15.873	60	29.51	11.036									
40-60	2.751	15.873	60	29.51	9.671									
50-60	1.349	15.873	60	29.51	8.269									
REGISTRO DE DATOS														
Fecha	Hora de Inicio	Tiempo t			Tem p (°C)	C _t	Lectura hidrómetro		% más fino	R	L (m m)	K	D (mm)	% más fino respecto al total
		hr s	mi n	se g			toma da (R _{real})	Corregi da (R _c)						
				10	22.0	0.4	56.0	51.94	106.15	52.94	59.9	0.0106	0.0260	101.38
				15	22.0	0.4	53.0	48.94	100.02	49.94	56.9	0.0106	0.0207	95.53
				30	21.5	0.3	52.0	47.82	97.71	48.82	55.7	0.0107	0.0146	93.33
			1		21.0	0.2	52.0	47.69	97.46	48.69	55.6	0.0108	0.0104	93.08
			2		21.0	0.2	50.5	46.19	94.39	47.19	54.1	0.0108	0.0072	90.16
			5		21.5	0.3	45.0	40.82	83.41	41.82	48.7	0.0107	0.0043	79.66
			10		21.5	0.3	40.0	35.82	73.19	36.82	43.7	0.0107	0.0029	69.90
			15		22.0	0.4	38.0	33.94	69.36	34.94	41.9	0.0106	0.0023	66.25
			30		21.5	0.3	33.0	28.82	58.89	29.82	36.7	0.0107	0.0015	56.24
			1		21.0	0.2	30.0	25.69	52.50	26.69	33.6	0.0108	0.0010	50.14
			2		21.0	0.2	20.0	15.69	32.06	16.69	23.6	0.0108	0.0006	30.63
			4		20.5	0.1	18.5	14.07	28.75	15.07	22.0	0.0108	0.0004	27.46
			24		20.0	0.0	16.0	11.50	23.50	12.50	19.4	0.0109	0.0002	22.45
			46	80	20.0	0.0	15.0	10.50	21.46	11.50	18.4	0.0109	0.0001	20.49

A.6. Límites de Consistencia Atterberg

A.6.1. Suelo natural

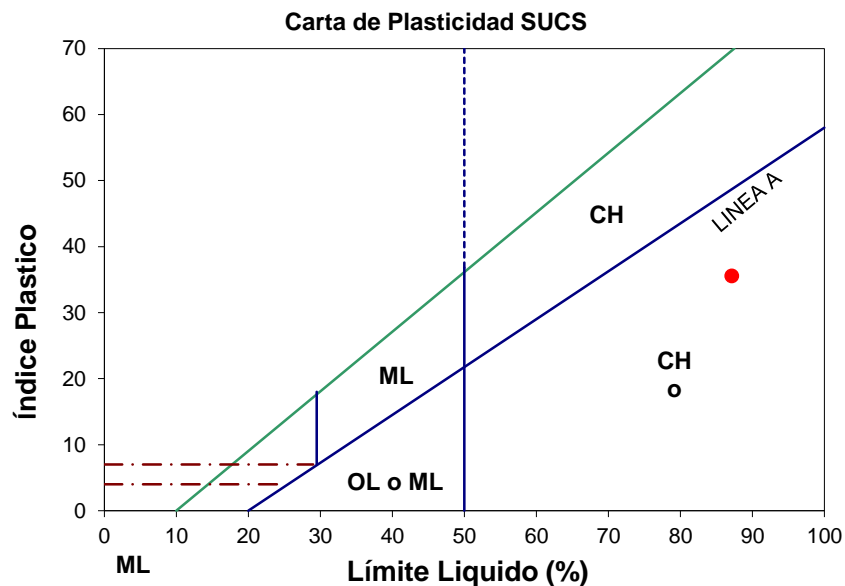
LÍMITE LIQUIDO								
Vidrio No.	Masa tara (g)	Masa tara + muestr.hum. (g)	Masa tara + muestr. Seca (g)	Masa del agua (g)	Masa de muestr.Seca (g)	% de humedad	No. Golpes	Observaciones
3	125.23	130.94	128.23	2.71	3.00	90.33	15	
1	118.66	126.25	122.76	3.49	4.10	85.12	23	
4	124.65	133.08	129.14	3.94	4.49	87.75	27	
2	123.26	129.01	126.35	2.66	3.09	86.08	36	

LÍMITE PLASTICO						
Capsula No.	Masa tara (g)	Masa tara + muestr.hum. (g)	Masa tara + muestr. Seca (g)	Masa del agua (g)	Masa de muestr.Seca (g)	% de humedad
4	116.83	119.18	118.38	0.80	1.55	51.61

RESULTADOS	
Límite Líquido (LL)	87.16%
Límite Plástico (LP)	51.61%
Índice Plástico (IP)	35.54%
Índice de Liquidez (IL)	-77.66%
Contracción Lineal (CL)	21.25%
Límite Contracción (LC)	16.08%
Actividad de la Arcilla (A)	0.63

CONTRACCIÓN LINEAL					
Long. Inc. (cm)	10.120	Long. Final (cm)	7.970	Contracción (cm)	2.150

LIMITE DE CONTRACCION										
Petri No.	Masa Petri (gr)	Masa Petri + muestr.hum. (g)	Masa petri + muestr. Seca (g)	Masa mh (gr)	Masa ms (gr)	M ms+p (gr)	M' ms+p (gr)	Vol. petri (cm ³)	Vol. ms (cm ³)	LC (%)
4	18.32	74.19	70.70	55.87	52.38	32.37	11.66	36.62	41.55	16.08



A.6.2. Suelo contaminado con Diésel.

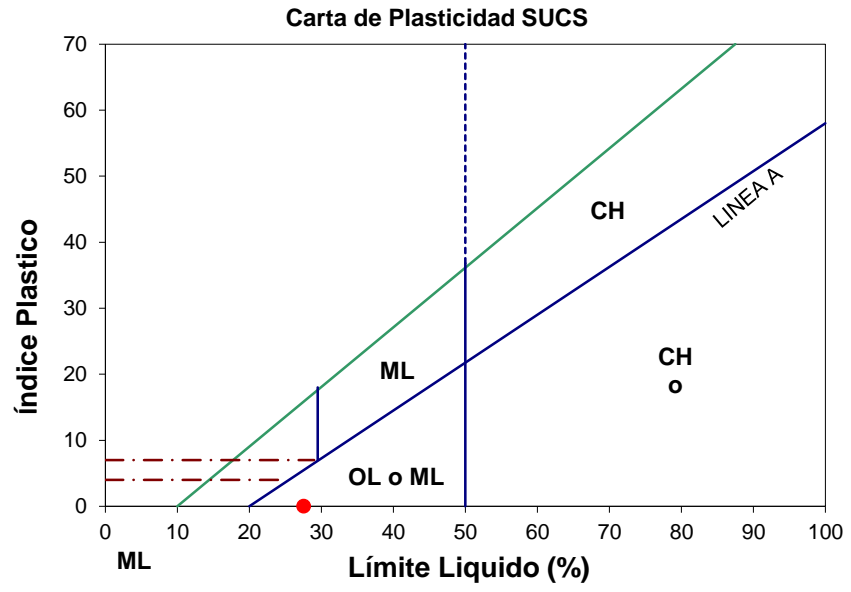
LÍMITE LIQUIDO								
Vidrio No.	Masa tara (g)	Masa tara + mue. hum. (g)	Masa tara + mue. Seca (g)	Masa del agua (g)	Masa de mue. Seca (g)	% de humedad	Penetración mm	Observaciones
1	119.50	130.68	128.31	2.37	8.81	26.90	176	
2	120.73	130.37	128.27	2.10	7.54	27.85	194	
3	119.16	142.51	137.39	5.12	18.23	28.09	217	
4	123.22	144.90	140.17	4.73	16.95	27.91	280	

LÍMITE PLASTICO						
Capsula No.	Masa tara (g)	Masa tara + mue. hum. (g)	Masa tara + mue. Seca (g)	Masa del agua (g)	Masa de mue. Seca (g)	% de humedad

RESULTADOS	
Límite Líquido (LL)	27.57 %
Límite Plástico (LP)	NP
Índice Plástico (IP)	NP
Índice de Liquidez (IL)	NP
Contracción Lineal (CL)	NP
Límite Contracción (LC)	NP
Actividad de la Arcilla (A)	NP

CONTRACCIÓN LINEAL					
Long. Inic. (cm)	10.131	Long. Final (cm)	10.131	Contracción (cm)	0.000

LÍMITE DE CONTRACCIÓN										
Petri No.	Masa Petri (gr)	Masa Petri + mue. hum. (g)	Masa petri + mue. Seca (g)	Masa mh (gr)	Masa ms (gr)	M ms+p (gr)	M' ms+p (gr)	Vol. petri (cm ³)	Vol. ms (cm ³)	LC (%)
1	18.23	74.18	63.11	55.95	44.88	0.00	0.00	37.80	46.75	NP



ANEXO B. CURVAS DE RETENCIÓN AGUA-SUELO

B.1. Curva de Retención Agua- Suelo 1.

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Agua	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_w (%)	Gw (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0S	0.97	0.00	0	28.90	31.82	28.90
1	0.98	4.87	10	29.69	46.83	31.14
2	0.97	9.74	20	30.00	47.11	32.92
3	1.09	14.61	30	28.97	46.96	33.20
4	1.04	19.48	40	30.24	47.15	36.13
5	0.97	24.35	50	30.38	48.14	37.78
6	0.98	29.22	60	29.95	47.03	38.70
7	1.01	34.09	70	30.59	46.62	41.02
8	0.99	38.96	80	29.93	46.89	41.59
9	1.02	43.83	90	30.14	47.10	43.35
10	1.02	48.70	100	30.00	46.94	44.61
Pruebas	0.60		100	29.79	35.98	29.79
	0.90		100	30.16	39.88	30.16
	TEORICO	24.01	50.39	31.35	39.18	39.18

SECADO

Muestra	Fecha de Colocación	Fecha de Extracción	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Humedad Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
05	11-Oct-14	18-Oct-14	05	201.00	31.35	0.2631	0.2189	0.2248	0.2639	0.0008	0.0059	0.30	232.35	231.53	2.69	163423.00
1	26-Nov-14	3-Dec-14	1	202.72	32.44	0.2531	0.2567	0.2598	0.2670	0.0139	0.0031	5.49	235.16	232.41	9.26	64443.77
2	29-Oct-14	5-Nov-14	2	203.1	33.62	0.2361	0.2540	0.2612	0.2425	0.0064	0.0072	2.71	236.72	233.10	12.07	106129.29
3	22-Oct-14	29-Oct-14	3	125.02	32.88	0.2717	0.2387	0.3082	0.2725	0.0008	0.0695	0.29	157.90	153.99	13.50	163705.37
4	20-Oct-14	27-Oct-14	4	201.96	37.02	0.2402	0.2164	0.2318	0.2565	0.0163	0.0154	6.79	238.98	232.20	22.42	51093.98
5	17-Oct-14	24-Oct-14	5	202.95	38.46	0.2272	0.2181	0.2553	0.2664	0.0392	0.0372	17.25	241.41	233.33	26.60	7815.39
6	15-Oct-14	22-Oct-14	6	125.25	40.59	0.1964	0.1916	0.2312	0.2402	0.0438	0.0396	22.30	165.84	155.20	35.53	3160.23
7	22-Oct-14	29-Oct-14	7	126.63	40.79	0.2340	0.2391	0.2862	0.2864	0.0524	0.0471	22.39	167.42	157.22	33.34	3108.66
8	15-Oct-14	22-Oct-14	8	125.25	34.46	0.1950	0.1945	0.2459	0.2530	0.0580	0.0514	29.74	159.71	149.59	41.58	831.71
9	15-Oct-14	22-Oct-14	9	124.65	45.58	0.1902	0.1919	0.2422	0.2486	0.0584	0.0503	30.70	170.23	154.79	51.23	700.03
10	11-Oct-14	18-Oct-14	10	197.91	45.37	0.1860	0.1865	0.2345	0.2789	0.0929	0.0480	49.95	243.28	227.91	51.23	22.19

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Agua	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_w (%)	G ω (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0S	0.97	0.00	0	33.09	33.09	33.09
1H	1.02	4.87	10	30.20	33.02	31.67
2H	0.97	9.74	20	30.69	34.42	33.68
3H	0.96	14.61	30	30.65	35.74	35.13
4H	0.97	19.48	40	29.94	35.98	35.77
5H	0.94	24.35	50	30.29	38.54	37.67
6H	0.90	29.22	60	30.33	39.49	39.19
7H	1.00	34.09	70	29.65	39.49	39.76
8H	1.05	38.96	80	28.76	40.26	39.96
9H	1.05	43.83	90	29.62	42.89	42.60
10H	1.13	48.70	100	28.65	43.25	42.60
Pruebas	0.80		100	29.78	35.98	29.78
	0.84		100	29.71	39.88	29.71
	TEORICO	24.01	50.39	31.35	39.18	39.18

HUMEDECIMIENTO

Muestra	Fecha de Colocación	Fecha de Extracción	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Humedad Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie B	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
0H	24-Nov-14	1-Dec-14	0H	198.31	33.09	0.2415	0.2515	0.2523	0.2417	0.0002	0.0008	0.08	231.40	231.40	0.00	170039.04
1H	25-Nov-14	2-Dec-14	1H	202.91	33.02	0.2198	0.2301	0.2425	0.2303	0.0105	0.0124	4.78	235.93	233.11	9.34	73259.89
2H	11-Oct-14	18-Oct-14	2H	201.91	34.42	0.1942	0.1899	0.2008	0.2055	0.0113	0.0109	5.82	236.33	232.60	12.15	60774.29
3H	11-Oct-14	18-Oct-14	3H	201.59	35.74	0.1806	0.1875	0.2086	0.2012	0.0206	0.0211	11.41	237.33	232.24	16.61	22306.92
4H	11-Oct-14	18-Oct-14	4H	200.59	35.98	0.1783	0.1999	0.2296	0.2058	0.0275	0.0297	15.42	236.57	230.53	20.17	10852.10
5H	11-Oct-14	18-Oct-14	5H	197.51	38.54	0.1893	0.1950	0.2494	0.2438	0.0545	0.0544	28.79	236.05	227.80	27.24	986.82
6H	11-Oct-14	18-Oct-14	6H	201.74	39.49	0.1767	0.1780	0.2178	0.2207	0.0440	0.0398	24.90	241.23	232.07	30.20	1982.51
7H	13-Oct-14	20-Oct-14	7H	200.98	39.49	0.1857	0.1886	0.2313	0.2317	0.0460	0.0427	24.77	240.47	230.63	33.19	2029.22
8H	11-Oct-14	18-Oct-14	8H	201.37	40.26	0.1887	0.1885	0.2460	0.2412	0.0525	0.0575	27.82	241.63	230.13	39.99	1174.01
9H	13-Oct-14	20-Oct-14	9H	201.65	42.89	0.1833	0.1820	0.2325	0.2412	0.0579	0.0505	31.59	244.54	231.27	44.80	597.49
10H	13-Oct-14	20-Oct-14	10H	201.57	43.25	0.1836	0.1895	0.2332	0.2570	0.0734	0.0437	39.98	244.82	230.78	48.07	132.65

B.2. Curva de Retención Agua- Suelo 2.

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Agua	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_w (%)	G ω (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0S	0.97	0.00	0	30.61	30.53	30.61
1a	1.09	4.87	10	30.26	32.82	31.73
2a	1.09	9.74	20	30.50	34.20	33.47
3a	0.88	14.61	30	30.81	35.30	35.31
4a	0.83	19.48	40	30.03	37.43	35.88
5a	1.05	24.35	50	30.48	39.95	37.90
6a	1.03	29.22	60	30.58	39.83	39.52
7a	1.12	34.09	70	30.67	40.74	41.13
8a	0.99	38.96	80	30.83	44.61	42.84
9a	1.12	43.83	90	31.42	44.57	45.19
10a	0.99	48.70	100	29.96	44.77	44.55
Pruebas	0.60		100	29.79	35.98	29.79
	0.90		100	30.16	39.88	30.16
	TEORICO	24.01	50.39	31.35	39.18	39.18

SECADO

Muestra	Fecha de Colocación	Fecha de Extracción	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Humedad Real	Succión (ψ)
No.	dia/mes/año	dia/mes/año		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
0S	11-Oct-14	18-Oct-14	0S	201.00	31.35	0.2631	0.2189	0.2248	0.2639	0.0008	0.0059	0.30	232.35	231.53	2.69	163423.00
1a	24-Nov-14	1-Dec-14	1	201.84	32.82	0.1858	0.1842	0.1857	0.1875	0.0017	0.0015	0.91	234.66	232.10	8.46	146461.82
2a	29-Oct-14	5-Nov-14	2	203.04	34.20	0.2352	0.2473	0.2541	0.2390	0.0038	0.0068	1.62	237.24	233.54	12.13	129163.90
3a	21-Oct-14	28-Oct-14	3	202.92	35.30	0.2521	0.2275	0.2436	0.2703	0.0182	0.0161	7.22	238.22	233.73	14.57	47272.88
4a	17-Oct-14	24-Oct-14	4	203.01	37.43	0.2309	0.2315	0.2663	0.2748	0.0439	0.0348	19.01	240.44	233.04	24.64	5700.61
5a	17-Oct-14	24-Oct-14	5	127.61	39.95	0.1794	0.1864	0.2203	0.2069	0.0275	0.0339	15.33	167.56	158.09	31.07	11037.75
6a	23-Oct-14	30-Oct-14	6	201.97	39.83	0.2415	0.2262	0.2725	0.2930	0.0515	0.0463	21.33	241.80	232.55	30.25	3765.12
7a	17-Oct-14	24-Oct-14	7	203.06	40.74	0.1885	0.1886	0.2271	0.2288	0.0403	0.0385	21.38	243.80	233.73	32.83	3728.65
8a	15-Oct-14	22-Oct-14	8	116.83	44.61	0.1945	0.1782	0.2278	0.2525	0.0580	0.0496	29.82	161.44	147.66	44.70	820.39
9a	14-Oct-14	21-Oct-14	9	200.31	44.57	0.1915	0.1914	0.2428	0.2490	0.0575	0.0514	30.03	244.88	231.73	41.85	790.62
10a	14-Oct-14	21-Oct-14	10	199.97	44.77	0.1863	0.1850	0.2330	0.2640	0.0777	0.0480	41.71	244.74	229.93	49.43	97.28

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Agua	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat despues hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_w (%)	G ω (%)	(gr)	(gr)	(gr)
OH	0.97	0.00	0	28.90	33.09	28.90
1aH	1.11	4.87	10	30.41	33.14	31.89
2aH	1.08	9.74	20	30.49	34.50	33.46
3aH	1.05	14.61	30	30.18	35.28	34.59
4aH	1.03	19.48	40	30.35	37.51	36.26
5aH	1.08	24.35	50	30.37	38.55	37.77
6aH	1.00	29.22	60	27.41	36.33	35.42
7aH	0.98	34.09	70	30.26	41.24	40.58
8aH	1.14	38.96	80	28.76	40.09	39.96
9aH	1.05	43.83	90	22.04	35.06	31.70
10aH	1.13	48.70	100	27.53	41.29	40.94
Pruebas	0.80		100	29.78	35.98	29.78
	0.84		100	29.71	39.88	29.71
	TEORICO	24.01	50.39	31.35	39.18	39.18

HUMEDECIMIENTO

Muestra	Fecha de Colocación	Fecha de Extracción	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Humedad Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie B	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
OH	24-Nov-14	1-Dec-14	OH	198.31	33.09	0.2415	0.2515	0.2523	0.2417	0.0002	0.0008	0.08	231.40	231.40	0.00	170039.04
1aH	25-Nov-14	2-Dec-14	1aH	202.88	33.14	0.2417	0.2891	0.2955	0.2447	0.0030	0.0064	1.24	236.02	233.29	8.98	138136.96
2aH	11-Oct-14	18-Oct-14	2aH	201.78	34.50	0.1978	0.1823	0.1948	0.2136	0.0158	0.0125	7.99	236.28	232.27	13.15	41185.58
3aH	11-Oct-14	18-Oct-14	3aH	202.76	35.28	0.1844	0.1920	0.2144	0.2059	0.0215	0.0224	11.66	238.04	232.94	16.90	21317.19
4aH	11-Oct-14	18-Oct-14	4aH	199.81	37.51	0.1944	0.1966	0.2219	0.2309	0.0365	0.0253	18.78	237.32	230.16	23.59	5948.01
5aH	11-Oct-14	18-Oct-14	5aH	198.79	38.55	0.1828	0.1885	0.2280	0.2232	0.0404	0.0395	22.10	237.34	229.16	26.93	3276.11
6aH	11-Oct-14	18-Oct-14	6aH	202.14	36.33	0.1889	0.1907	0.2420	0.2405	0.0516	0.0513	27.32	238.47	229.55	32.54	1285.52
7aH	13-Oct-14	20-Oct-14	7aH	202.15	41.24	0.1872	0.1852	0.2327	0.2373	0.0501	0.0475	26.76	243.39	232.41	36.29	1419.63
8aH	2-Dec-14	9-Dec-14	8aH	203.13	40.09	0.2598	0.2431	0.3219	0.4043	0.1445	0.0788	55.62	243.22	231.89	39.39	8.02
9aH	25-Nov-14	2-Dec-14	9aH	204.59	35.06	0.1901	0.2290	0.2811	0.2466	0.0565	0.0521	29.72	239.65	228.78	44.94	835.06
10aH	25-Nov-14	2-Dec-14	10aH	203.07	41.29	0.2109	0.2572	0.3155	0.2784	0.0675	0.0583	32.01	244.36	230.97	47.99	554.32

B.3. Curva de Retención Agua- Suelo 3.

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Agua	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat despues hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_w (%)	G ω (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0S	0.97	0.00	0	30.61	30.53	30.61
1b	0.94	4.87	10	30.29	32.71	31.77
2b	0.90	9.74	20	30.04	33.65	32.97
3b	0.93	14.61	30	30.71	35.54	35.20
4b	0.92	19.48	40	28.80	34.91	34.41
5b	0.92	24.35	50	30.53	38.00	37.96
6b	0.60	29.22	60	29.79	34.37	38.49
7b	0.56	34.09	70	31.09	41.08	41.69
8b	0.96	38.96	80	29.63	40.83	41.17
9b	0.90	43.83	90	30.16	43.88	43.38
10b	0.90	48.70	100	30.87	56.34	45.90
Pruebas	0.60		100	29.79	35.98	29.79
	0.90		100	30.16	39.88	30.16
	TEORICO	24.01	50.39	31.35	39.18	39.18

SECADO

Muestra	Fecha de Colocación	Fecha de Extracción	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Humedad Real	Succión (ψ)
No.	dia/mes/año	dia/mes/año		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
0S	11-Oct-14	18-Oct-14	0S	201.00	31.35	0.2631	0.2189	0.2248	0.2639	0.0008	0.0059	0.30	232.35	231.53	2.69	163423.00
1b	26-Nov-14	3-Dec-14	1b	203	32.71	0.2424	0.2430	0.2434	0.2407	-0.0017	0.0004	-0.70	235.71	233.29	7.99	195718.93
2b	29-Oct-14	5-Nov-14	2b	201.9	33.65	0.2594	0.2258	0.2322	0.2662	0.0068	0.0064	2.62	235.55	231.94	12.02	107842.58
3b	21-Oct-14	28-Oct-14	3b	201.68	35.54	0.1853	0.1708	0.1992	0.2192	0.0339	0.0284	18.29	237.22	232.39	15.73	6484.05
4b	17-Oct-14	24-Oct-14	4b	201.9	34.91	0.2498	0.2455	0.2665	0.2704	0.0206	0.0210	8.25	236.81	230.70	21.22	39317.88
5b	17-Oct-14	24-Oct-14	5b	203.04	38.00	0.1860	0.1836	0.2138	0.2166	0.0306	0.0302	16.45	241.04	233.57	24.47	9024.42
6b	15-Oct-14	22-Oct-14	6b	129.26	34.37	0.1816	0.1808	0.2130	0.2180	0.0364	0.0322	20.04	163.63	154.05	38.64	4737.71
7b	21-Oct-14	28-Oct-14	7b	201.96	41.08	0.2353	0.2490	0.2997	0.2865	0.0512	0.0507	21.76	243.04	233.05	32.13	3482.88
8b	22-Oct-14	29-Oct-14	8b	128.62	40.83	0.2306	0.2392	0.2966	0.2974	0.0668	0.0574	28.97	169.45	158.25	37.80	955.87
9b	14-Oct-14	21-Oct-14	9b	200.3	43.88	0.1785	0.1984	0.2492	0.2321	0.0536	0.0508	30.03	244.18	230.46	45.49	790.35
10a	2-Dec-14	9-Dec-14	10a	202.13	56.34	0.2458	0.2524	0.3028	0.3158	0.0700	0.0504	28.48	258.47	238.91	53.18	1043.59

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Agua	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat despues hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_w (%)	G ω (%)	(gr)	(gr)	(gr)
OH	0.97	0.00	0	28.90	33.09	28.90
1bH	0.94	4.87	10	28.72	32.19	30.12
2bH	0.90	9.74	20	28.91	33.20	31.73
3bH	0.93	14.61	30	28.67	33.91	32.86
4bH	0.92	19.48	40	29.24	35.28	34.94
5bH	0.92	24.35	50	30.11	37.60	37.44
6bH	0.60	29.22	60	26.69	34.97	34.49
7bH	0.56	34.09	70	25.84	35.58	34.65
8bH	0.96	38.96	80	29.62	42.45	41.16
9bH	0.90	43.83	90	28.52	43.22	41.02
10bH	0.90	48.70	100	29.02	41.80	43.15
Pruebas	0.80		100	29.78	35.98	29.78
	0.84		100	29.71	39.88	29.71
	TEORICO	24.01	50.39	31.35	39.18	39.18

HUMEDECIMIENTO

Muestra	Fecha de Colocación	Fecha de Extracción	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Humedad Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie B	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
OH	24-Nov-14	1-Dec-14	OH	198.31	33.09	0.2415	0.2515	0.2523	0.2417	0.0002	0.0008	0.08	231.40	231.40	0.00	170039.04
1bH	24-Nov-14	1-Dec-14	1bH	202.92	32.19	0.2741	0.2382	0.2396	0.2767	0.0026	0.0014	0.95	235.11	233.29	5.99	145581.86
2bH	24-Nov-14	1-Dec-14	2bH	202.87	33.20	0.2620	0.2710	0.2785	0.2679	0.0059	0.0075	2.25	236.07	232.27	12.93	115232.86
3bH	24-Nov-14	1-Dec-14	3bH	203.28	33.91	0.2075	0.2482	0.2594	0.2164	0.0089	0.0112	4.29	237.19	232.94	14.33	79960.35
4bH	24-Nov-14	1-Dec-14	4bH	202.15	35.28	0.2510	0.2519	0.2810	0.2670	0.0160	0.0291	6.37	237.43	230.16	25.96	55008.06
5bH	24-Nov-14	1-Dec-14	5bH	200.5	37.60	0.2451	0.2572	0.2834	0.2686	0.0235	0.0262	9.59	238.10	229.16	31.19	30910.13
6bH	25-Nov-14	2-Dec-14	6bH	199.97	34.97	0.2423	0.2189	0.2760	0.3059	0.0636	0.0571	26.25	234.94	229.55	18.22	1556.85
7bH	25-Nov-14	2-Dec-14	7bH	201.59	35.58	0.2318	0.2286	0.2804	0.2958	0.0640	0.0518	27.61	237.17	229.10	29.33	1219.50
8bH	25-Nov-14	2-Dec-14	8bH	201.79	42.45	0.2540	0.2534	0.3236	0.3425	0.0885	0.0702	34.84	244.24	231.41	43.32	333.25
9bH	25-Nov-14	2-Dec-14	9bH	201.77	43.22	0.2640	0.2617	0.3286	0.3522	0.0882	0.0669	33.41	244.99	230.23	51.86	430.95
10bH	2-Dec-14	9-Dec-14	10bH	201.58	41.80	0.2133	0.2062	0.2555	0.2953	0.0820	0.0493	38.44	243.38	229.06	52.11	174.68

B.4. Datos promedios para la construcción de la Curva Característica.

Secado							
1		2		3		Promedio	
Gw	succión	Gw	succión	Gw	succión	Gw	succión
(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa
0.00	163423.00	0.00	163423.00	0.00	163423.00	0.00	163423.00
19.02	64443.77	17.37	146461.82	14.53	195718.93	16.97	135541.51
24.78	106129.29	24.91	129163.90	21.85	107842.58	23.85	114378.59
27.71	163705.37	29.92	47272.88	28.60	6484.05	28.15	85094.71
46.04	51093.98	50.60	5700.61	38.57	39317.88	38.57	39317.88
54.61	7815.39	63.80	11037.75	44.49	9024.42	54.30	9292.52
60.63	3160.23	62.11	3765.12	70.26	4737.71	61.37	3462.67
64.59	3108.66	67.42	3728.65	58.42	3482.88	63.48	3440.06
85.38	831.71	91.78	820.39	68.73	955.87	81.96	869.32
105.19	700.03	85.94	790.62	82.71	790.35	91.28	760.33
105.20	22.19	101.50	97.28	96.69	1043.59	99.10	570.44

Humedecimiento							
1		2		3		Promedio	
Gw	succión	Gw	succión	Gw	succión	Gw	succión
(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa
0.00	170039.04	0.00	170039.04	0.00	170039.04	0.00	170039.04
19.17	73259.89	18.43	138136.96	10.90	145581.86	16.17	118992.90
24.96	60774.29	27.01	41185.58	23.50	115232.86	25.98	50979.93
34.10	22306.92	34.70	21317.19	26.05	79960.35	34.40	21812.06
41.42	10852.10	48.44	5948.01	47.19	55008.06	44.93	8400.05
55.93	986.82	55.31	3276.11	56.72	30910.13	55.62	2131.47
62.01	1982.51	66.82	1285.52	33.13	1556.85	64.42	1769.68
68.15	2029.22	74.51	1419.63	53.34	1219.50	65.33	1556.12
82.11	1174.01	80.89	8.02	78.76	333.25	80.43	753.63
91.99	597.49	92.27	835.06	94.30	430.95	93.14	514.22
98.70	132.65	98.55	554.32	94.75	174.68	97.33	287.22

ANEXO C. CURVAS DE RETENCIÓN GASOLINA-SUELO

C.1. Curva de Retención Gasolina- Suelo 1.

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Gasolina	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_{ga} (%)	G_{ga} (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0	0.94	0.00	0.00	30.60	30.60	30.60
10	0.94	3.28	25.02	31.42	32.40	32.45
20	1.00	6.56	50.04	30.99	33.42	33.02
30	0.98	9.83	74.98	30.51	34.50	33.51
40	0.90	13.11	100.00	30.57	35.55	34.58
Pruebas	0.80		100	31.35	38.71	31.35
	0.84		100	30.57	35.46	30.57
	0.76		100	31.35	35.46	31.35

SECADO

Mues.	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inf.	Sup.	Sup.	Inf.	Inf.	Sup.	Agua en el papel	Wf+mh	Wf+ms	Cont. de Gasolina Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ga (%)	kPa
0	17-Oct-14	24-Oct-14	B13	203.42	30.60	0.2198	0.2506	0.2540	0.2216	0.0018	0.0034	0.82	234.02	234.02	0.00	149006.6
10	17-Oct-14	24-Oct-14	B14	202.87	33.74	0.1908	0.1912	0.1961	0.1925	0.0017	0.0049	0.89	236.61	234.29	7.38	147093.1
20	17-Oct-14	24-Oct-14	B15	201.90	33.68	0.2262	0.2401	0.2443	0.2289	0.0027	0.0042	1.19	235.58	232.89	8.68	139320.8
30	17-Oct-14	24-Oct-14	B16	202.90	33.46	0.1862	0.1851	0.1866	0.1924	0.0062	0.0015	3.33	236.36	233.41	9.67	94975.6
40	17-Oct-14	24-Oct-14	B17	203.08	34.52	0.1874	0.1896	0.1903	0.2132	0.0258	0.0007	13.77	237.60	233.65	12.92	14605.76

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Diesel	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm sat. después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_{Ga} (%)	G_{Ga} (%)	(gr)	(gr)	(gr)
1H	1.00	0.00	0.00	30.36	30.36	30.36
2H	1.05	3.28	25.02	30.65	32.40	31.66
3H	1.01	6.56	50.04	31.35	33.44	33.41
4H	1.01	9.83	74.98	31.05	34.50	34.10
5H	1.01	13.11	100.00	30.87	35.55	34.92
Pruebas	0.80		100	31.35	38.71	31.35
	0.84		100	30.57	35.46	30.57
	0.76		100	31.35	35.46	31.35

HUMEDECIMIENTO

Mues.	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inf.	Sup.	Sup.	Inf.	Inf.	Sup.	Agua en el papel	Wf+mh	Wf+ms	Cont. de Gasolina Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ga (%)	kPa
1	17-Oct-14	24-Oct-14	R7	119.67	30.36	0.1796	0.1882	0.1890	0.1812	0.0016	0.0008	0.89	150.03	150.03	0.00	147096.2
2	17-Oct-14	24-Oct-14	B19	203.12	32.24	0.1832	0.1829	0.1858	0.1849	0.0017	0.0029	0.93	235.36	233.77	5.19	146121.1
3	17-Oct-14	24-Oct-14	R8	201.87	33.24	0.1896	0.1813	0.1851	0.1915	0.0019	0.0038	1.00	235.11	233.22	6.03	144190.2
4	17-Oct-14	24-Oct-14	R4	201.85	33.69	0.1857	0.1802	0.1828	0.1934	0.0077	0.0026	4.15	235.54	232.90	8.50	82033.2
5	17-Oct-14	24-Oct-14	R6	201.86	34.56	0.1815	0.1763	0.1806	0.1937	0.0122	0.0043	6.72	236.42	232.73	11.95	51686.2

C.2. Curva de Retención Gasolina- Suelo 2.

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Gasolina	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_{ga} (%)	G_{ga} (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0	0.94	0.00	0.00	30.60	30.60	30.60
10	0.94	3.28	25.02	31.24	32.40	32.26
20	1.00	6.56	50.04	31.26	33.42	33.31
30	0.98	9.83	74.98	31.06	34.50	34.11
40	0.90	13.11	100.00	31.12	35.55	35.20
Pruebas	0.80		100	31.35	38.71	31.35
	0.84		100	30.57	35.46	30.57
	0.76		100	31.35	35.46	31.35

SECADO

Mues.	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo		Cont. de Gasolina Real	Succión (ψ)
						Inf.	Sup.	Sup.	Inf.	Inf.	Sup.	Agua en el papel	Wf+mh	Wf+ms		
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ga (%)	kPa
0	17-Oct-14	24-Oct-14	B13	203.42	30.60	0.2415	0.2560	0.2571	0.2421	0.0006	0.0011	0.25	234.02	234.02	0.00	165061.6
10	17-Oct-14	24-Oct-14	B14	202.90	33.62	0.1908	0.1912	0.1961	0.1925	0.0017	0.0049	0.89	236.52	234.14	7.62	147093.1
20	17-Oct-14	24-Oct-14	B15	202.87	33.32	0.2259	0.2505	0.2533	0.2275	0.0016	0.0028	0.71	236.19	234.13	6.59	151993.5
30	17-Oct-14	24-Oct-14	B16	201.90	33.65	0.2578	0.2613	0.2639	0.2626	0.0048	0.0026	1.86	235.55	232.96	8.34	123582.6
40	17-Oct-14	24-Oct-14	B17	203.08	35.06	0.2605	0.2437	0.2478	0.2788	0.0183	0.0041	7.02	238.14	234.20	12.66	48950.40

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Diesel	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm sat. después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_{ga} (%)	G_{ga} (%)	(gr)	(gr)	(gr)
1H	1.00	0.00	0.00	30.36	30.36	30.36
2H	1.05	3.28	25.02	30.61	32.40	31.61
3H	1.01	6.56	50.04	31.04	33.44	33.08
4H	1.01	9.83	74.98	31.11	34.50	34.17
5H	1.01	13.11	100.00	31.04	35.55	35.11
Pruebas	0.80		100	31.35	38.71	31.35
	0.84		100	30.57	35.46	30.57
	0.76		100	31.35	35.46	31.35

HUMEDECIMIENTO

Mues.	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inf.	Sup.	Sup.	Inf.	Inf.	Sup.	Agua en el papel	Wf+mh	Wf+ms	Cont. de Gasolina Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	g_a (%)	kPa
1	17-Oct-14	24-Oct-14	R7	119.67	30.36	0.1796	0.1882	0.1890	0.1812	0.0016	0.0008	0.89	150.03	150.03	0.00	147096.16
2	17-Oct-14	24-Oct-14	B19	203.12	32.33	0.1684	0.1769	0.1787	0.1709	0.0025	0.0018	1.48	235.45	233.73	5.62	132236.92
3	17-Oct-14	24-Oct-14	R8	201.87	33.04	0.1607	0.1696	0.1839	0.1696	0.0089	0.0143	5.54	234.91	232.91	6.44	63909.99
4	17-Oct-14	24-Oct-14	R4	201.85	33.77	0.2379	0.2235	0.2246	0.2511	0.0132	0.0011	5.55	235.62	232.96	8.55	63792.26
5	17-Oct-14	24-Oct-14	R6	201.86	34.36	0.2455	0.2545	0.2593	0.2639	0.0184	0.0048	7.49	236.22	232.90	10.70	44993.17

C.3. Datos promedios para la construcción de la Curva Característica.

Secado					
1		2		Promedio	
G_{ga}	succión	G_{ga}	succión	G_{ga}	succión
(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa
0.00	149006.65	0.00	165061.57	0.00	157034.11
56.32	147093.08	58.11	147093.08	56.32	147093.08
66.21	139320.79	50.27	151993.54	58.24	145657.17
73.75	94975.64	63.61	123582.60	68.68	109279.12
98.56	14605.76	96.57	48950.40	97.57	31778.08

Humedecimiento					
1		2		Promedio	
G_{ga}	succión	G_{ga}	succión	G_{ga}	succión
(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa
0.00	147096.16	0.00	147096.16	0.00	147096.16
39.57	146121.08	42.86	132236.92	41.22	139179.00
45.99	144190.17	49.15	63909.99	47.57	104050.08
64.85	82033.22	65.22	63792.26	65.04	72912.74
91.18	51686.21	81.59	44993.17	86.38	48339.69

ANEXO D. CURVAS DE RETENCIÓN DIÉSEL-SUELO

D.1. Curva de Retención Diésel- Suelo.

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Diesel	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm real sat después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_{di} (%)	G_{di} (%)	(gr)	(gr)	(gr)
0	0.94	0.00	0	29.39	29.39	29.39
10	0.94	3.15	10	29.47	30.67	30.40
20	1.00	6.30	20	29.25	33.00	31.09
30	0.98	9.45	30	29.90	34.02	32.72
40	0.90	12.60	40	29.56	35.03	33.28
50	0.89	15.75	50	29.49	35.35	34.13
60	1.03	18.89	60	29.91	36.10	35.56
70	1.03	22.04	70	30.11	37.51	36.75
80	0.91	25.19	80	29.01	37.43	36.32
90	1.00	28.34	90	29.28	37.76	37.58
100	1.00	31.49	100	29.55	37.16	38.86
Pruebas	0.80		100	29.78	35.98	29.78
	0.84		100	29.71	39.88	29.71
	0.76		100	29.38	34.76	29.38

SECADO

Mues.	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Fras.	WF Frascvo	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inf.	Sup.	Sup.	Inf.	Inf.	Sup.	Agua en el papel	Wf+m h	Wf+m s	Cont. De Diesel Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ωdi (%)	kPa
0	29-Jul-15	5-Aug-15	E19	202.05	29.39	0.2462	0.2501	0.2510	0.2466	0.0004	0.0009	0.16	231.44	231.44	0.00	167626.87
10	29-Jul-15	5-Aug-15	E20	203.15	30.71	0.2696	0.2718	0.2768	0.2745	0.0049	0.0050	1.82	233.86	232.62	4.21	124570.78
20	30-Jul-15	6-Aug-15	E8	202.09	31.87	0.2614	0.2274	0.2276	0.2663	0.0049	0.0002	1.87	233.96	231.34	8.96	123303.31
30	29-Jul-15	5-Aug-15	E9	202.03	33.66	0.2278	0.2434	0.2478	0.2370	0.0092	0.0044	4.04	235.69	231.93	12.58	83635.51
40	30-Jul-15	6-Aug-15	E10	203.06	33.89	0.2305	0.2316	0.2377	0.3229	0.0924	0.0061	40.09	236.95	232.62	14.65	130.09
50	29-Jul-15	5-Aug-15	E11	203.29	34.70	0.2543	0.2385	0.2437	0.3792	0.1249	0.0052	49.12	237.99	232.78	17.67	25.76
60	29-Jul-15	5-Aug-15	E12	203.24	35.38	0.2240	0.2403	0.2449	0.3830	0.1590	0.0046	70.98	238.62	233.15	18.29	0.51
70	29-Jul-15	5-Aug-15	E13	201.97	37.02	0.2250	0.2318	0.2383	0.3970	0.1720	0.0065	76.44	238.99	232.08	22.95	0.19
80	30-Jul-15	6-Aug-15	E14	203.14	36.54	0.2383	0.2307	0.2412	0.4547	0.2164	0.0105	90.81	239.68	232.15	25.96	0.01
90	30-Jul-15	6-Aug-15	E15	202.09	36.89	0.2373	0.2717	0.2775	0.4488	0.2115	0.0058	89.13	238.98	231.37	25.99	0.02
100	4-Aug-15	11-Aug-15	E18	203.11	38.82	0.1994	0.2213	0.2229	0.3925	0.1931	0.0016	96.84	241.93	232.66	31.37	0.005

Muestra	Peso papel Alum.	Contenido de Diesel	Grad. Sat. Propuesto	Ws seca	Wm sat. después hum.	Wm para ensayar
No.	(gr)	ω_{di} (%)	G_{di} (%)	(gr)	(gr)	(gr)
1H	1.00	0.00	0	28.84	28.84	28.84
2H	1.05	3.15	10	28.89	29.84	29.80
3H	1.01	6.30	20	29.15	31.06	30.99
4H	1.01	9.45	30	29.46	32.29	32.24
5H	1.01	12.60	40	29.06	32.76	32.72
6H	1.01	15.75	50	28.84	33.43	33.38
7H	1.01	18.89	60	29.74	35.36	35.36
8H	1.05	22.04	70	29.25	34.99	35.70
9H	1.04	25.19	80	28.92	36.25	36.21
10H	1.09	28.34	90	28.82	37.04	36.99
11H	1.09	31.49	100	29.32	37.76	38.55
Pruebas	0.80		100	29.78	35.98	29.78
	0.84		100	29.71	39.88	29.71
	0.76		100	29.38	34.76	29.38

HUMEDECIMIENTO

Muestra	Fecha de Colocacion	Fecha de Extraccion	Frasco	Peso del Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inferior	Superior	Superior	Inferior	Inferior	Superior	Humedad del papel	Wf+mh Frasco + muestra húmeda	Wf+ms Frasco + muestra seca	Contenido Real Diesel	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Serie B	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
0	17-Jul-15	24-Jul-15	R7	203.14	28.84	0.2333	0.2935	0.2938	0.2336	0.0003	0.0003	0.13	231.98	231.98	0.00	168648.64
10	17-Jul-15	24-Jul-15	B19	198.80	30.12	0.2502	0.2206	0.2209	0.2537	0.0035	0.0003	1.40	228.92	227.69	4.26	134284.90
20	17-Jul-15	24-Jul-15	R8	205.10	31.27	0.2404	0.2819	0.2838	0.2467	0.0063	0.0019	2.62	236.37	234.25	7.27	107858.09
30	17-Jul-15	24-Jul-15	R4	203.38	32.93	0.2332	0.2393	0.2441	0.2452	0.0120	0.0048	5.15	236.31	232.84	11.78	68571.30
40	17-Jul-15	24-Jul-15	R6	200.39	33.25	0.2660	0.2383	0.2404	0.3880	0.1220	0.0021	45.86	233.64	229.45	14.42	46.15
50	17-Jul-15	24-Jul-15	B10	198.43	33.16	0.2210	0.2396	0.2420	0.3194	0.0984	0.0024	44.52	231.59	227.27	14.98	58.68
60	17-Jul-15	24-Jul-15	R1	198.84	34.40	0.2510	0.2593	0.2616	0.3737	0.1227	0.0023	48.88	233.24	228.58	15.67	26.85
70	17-Jul-15	24-Jul-15	B21	199.01	35.16	0.2530	0.2309	0.2312	0.4357	0.1827	0.0003	72.21	234.17	228.26	20.21	0.41
80	23-Jul-15	30-Jul-15	B22	200.23	35.77	0.2223	0.2449	0.2499	0.4383	0.2160	0.0050	97.17	236.00	229.15	23.69	0.005
90	23-Jul-15	30-Jul-15	B23	199.98	36.69	0.2223	0.2529	0.2584	0.4357	0.2134	0.0055	96.00	236.67	228.80	27.31	0.01
100	23-Jul-15	30-Jul-15	B18	197.97	37.81	0.2510	0.2098	0.2232	0.4715	0.2205	0.0134	87.85	235.78	227.29	28.96	0.02

D.2. Repeticiones Humedecimiento.

HUMEDECIMIENTO

Mues.	Fecha de Inicio	Fecha de Fin	Fras	WF Frasco	Wm real	PAPEL SECO		PAPEL HUMEDO		HUMEDAD ABSORBIDA			Muestra de suelo			Succión (ψ)
						Inf.	Sup.	Sup.	Inf.	Inf.	Sup.	Agua en el papel	Wf+mh	Wf+ms	Cont. De Diesel Real	
No.	dia/mes/año	dia/mes/año	Ser	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	ω (%)	(gr)	(gr)	ω (%)	kPa
40	4-Aug-15	11-Aug-15	R6	200.39	33.27	0.2411	0.2296	0.2340	0.3782	0.1371	0.0044	56.86	233.66	229.22	15.40	6.42
50	19-Aug-15	26-Aug-15	E12	203.24	34.05	0.2155	0.2372	0.2460	0.3220	0.1065	0.0088	49.42	237.29	231.92	18.72	24.39
60	4-Aug-15	11-Aug-15	R1	199.01	34.47	0.2215	0.2446	0.2472	0.3791	0.1576	0.0026	71.15	233.48	227.99	18.94	0.49
70	4-Aug-15	11-Aug-15	B21	198.84	36.54	0.2250	0.2423	0.2498	0.3980	0.1730	0.0075	76.89	235.38	228.33	23.91	0.18
80	4-Aug-15	11-Aug-15	R7	203.14	36.92	0.2549	0.2360	0.2415	0.4537	0.1988	0.0055	77.99	240.06	232.44	26.01	0.15
90	19-Aug-15	26-Aug-15	B19	198.80	37.80	0.1861	0.2008	0.2055	0.3419	0.1558	0.0047	83.72	236.60	228.20	28.57	0.05
100	19-Aug-15	26-Aug-15	E23	203.01	37.61	0.2081	0.2128	0.2180	0.4130	0.2049	0.0052	98.46	240.62	231.68	31.18	0.004

D.3. Datos promedios para la construcción de la Curva Característica.

Secado

1		Promedio	
G _{di}	Succión	G _{di}	Succión
(%)	kPa	(%)	kPa
0.00	167626.87	0.00	167626.87
13.36	124570.78	13.36	124570.78
28.44	123303.31	28.44	123303.31
39.93	83635.51	39.93	83635.51
46.52	130.09	46.52	130.09
56.10	25.76	56.10	25.76
58.08	0.51	58.08	0.51
72.88	0.19	72.88	0.19
82.43	0.01	82.43	0.10
82.54	0.02	82.54	0.10
99.62	0.005	99.62	0.10

Humedecimiento

1		2		Promedio	
G _{di}	succión	G _{di}	succión	G _{di}	succión
(%)	kPa	(%)	kPa	(%)	kPa
0.00	168648.64	-	-	0.00	168648.64
13.52	134284.90	-	-	13.52	134284.90
23.10	107858.09	-	-	23.10	107858.09
37.40	68571.30	-	-	37.40	68571.30
45.79	46.15	28.00	6.42	45.79	46.15
47.57	58.68	34.04	24.39	47.57	41.54
49.76	26.85	34.44	0.49	49.76	26.85
64.16	0.41	43.47	0.18	53.81	0.29
75.22	0.00	47.29	0.15	61.25	0.10
86.72	0.01	51.95	0.05	69.33	0.10
91.95	0.02	56.70	0.00	74.32	0.10