

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS ARCILLOSOS AFECTADOS
POR DERRAMES SUPERFICIALES DE HIDROCARBUROS EN
CONCENTRACION POR PORCENTAJE EN PESO: 5, 10, 15 Y 30**

**NAZLY JULLYET GALINDO ORTIZ
CARLOS AUGUSTO RUEDA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA**

2012

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS ARCILLOSOS AFECTADOS
POR DERRAMES SUPERFICIALES DE HIDROCARBUROS EN
CONCENTRACION POR PORCENTAJE EN PESO: 5, 10, 15 Y 30**

**NAZLY JULLYET GALINDO ORTIZ
CARLOS AUGUSTO RUEDA**

**DIRECTOR:
MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN,
Ph.D. _____**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA**

2012

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIAS

Quisiera dedicar este proyecto realizado con tanto esfuerzo principalmente a Dios por regalarme la dicha de vivir día a día, por darme el privilegio de estudiar y formarme como profesional y por otorgarme la fuerza necesaria para salir adelante y no rendirme nunca sin importar las adversidades.

A mi madre Ligia Consuelo Bravo Plata y a mi padre Carlos Arnulfo Rueda Rueda porque han sido un pilar constante en mi formación que me han brindado su apoyo y su cariño en cada momento de mi vida, porque pude culminar esta meta gracias a su constante esfuerzo y dedicación.

A mi hermana Paola Fernanda Rueda Bravo que me ha impulsado a ser un ejemplo de perseverancia y dedicación, que siempre estuvo a mi lado animándome a luchar por mis sueños.

Carlos Augusto Rueda Bravo

Dedico esta tesis principalmente a Dios por regalarme la bendición de vivir cada día y haberme permitido lograr mis objetivos.

A mi hijo Jean Paul, por ser el motor principal que guía mi vida. Que a su escaso año de vida me han enseñado con su perseverancia que todas las metas se luchan.

A mi madre Martha Ortiz que ha sido mi apoyo constante durante mi proceso de aprendizaje, que luchó junto a mí, mis batallas. Que con su sabiduría me inculco la importancia de la formación académica y por la motivación de orgullo que siempre expreso hacia mí.

A mi hermana Leidy Paola Galindo porque siempre creyó en mis habilidades y me dio ejemplos dignos de superación y entrega

A Jimmy Hernández que ha sido un apoyo incondicional, que ha sabido esperar junto a mí los triunfos con paciencia y dedicación.

A todos mis amigos y familiares que siempre me han acompañado en mi desarrollo profesional y me han animado a seguir luchando por mis metas.

Nazly Julieth Galindo Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Es satisfactorio ver cómo años de esfuerzo, estudio, perseverancia, se condensan en la realización de una meta tan importante como lo es terminar mis estudios de pregrado y convertirme en un profesional. He conocido mucha gente durante este proceso le doy gracias a Dios porque siempre puso en mi camino personas que me brindaron apoyo y aportaron a mi desarrollo integral como profesional.

Agradezco a mis padres por creer en mí y ayudarme a lograr todo lo que me propuse a lo largo de esta etapa

Agradezco a todos aquellos amigos, profesores y estudiantes que aportaron para la realización exitosa de esta tesis.

Un agradecimiento especial a la doctora María Fernanda Serrano por su constante esmero desde el comienzo hasta la culminación de este largo e importante proceso.

También quisiera agradecer a Eli Rueda y Vicente Páez que pese a sus obligaciones encontraban siempre la manera de colaborar y orientar en todo lo estaba a su alcance.

Agradezco a mi compañera de tesis Nazly Julieth Galindo Ortiz por su gran esfuerzo y perseverancia para alcanzar nuestro objetivo exitosamente.

Carlos Augusto Rueda Bravo

Es un sueño hecho realidad, encontrarme terminando mi formación profesional como ingeniera civil. Y todo esto se lo debo a las personas que me apoyaron incondicionalmente con fuerza y coraje durante mi proceso de formación. Quienes me dieron ejemplo de constancia y dedicación.

Agradezco a Dios por ayudarme a terminar este proyecto, por darme la salud y valentía necesaria para culminar mis estudios.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mi hijo por cada alegría que me da y a mi mamá su preocupación en mi formación integral y su ejemplo de perseverancia.

Agradezco a Jimmy Hernández por su paciencia y cooperación a lo largo de este proceso.

Agradezco a todos mis familiares, amigos y profesores que depositaron su confianza en mí y me ayudaron a lograr todo lo que me propuse en este proceso.

Reconozco mi más profundo y sincero agradecimiento a la Doctora María Fernanda Serrano, directora de esta investigación quien ha sido pieza clave en la realización de este proyecto. Agradezco su colaboración, dedicación, confianza y paciencia durante esta etapa de mi vida.

Agradezco a mi compañero de tesis Carlos Augusto Rueda por su colaboración paciencia y esfuerzo en la realización de este trabajo.

Nazly Julieth Galindo Orti

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. GENERALIDADES	24
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.2 ALCANCE	25
1.3 JUSTIFICACION	26
1.4 OBJETIVOS	27
1.4.1 Objetivo General.	27
1.4.2 Objetivos específicos.	27
1.5 RELEVANCIA DEL ESTUDIO	27
1.6 ORGANIZACIÓN	28
2. MARCO TEORICO	29
2.1 TEORIA DE LOS SUELOS	30
2.1.1 Clasificación de suelos	31
2.1.2 Sistemas de clasificación de suelos	32
2.1.3 Importancia de los sistemas de clasificación de suelos, respecto a la caracterización de los mismo	40
2.2 TEORÍA DE PRODUCCIÓN DE LOS HIDROCARBUROS	43
2.2.1 Sistemas de exploración de hidrocarburos	43
2.2.1.1 Estudios sísmicos.	46
2.2.1.2 Prospección geoquímica.	50
2.2.1.3 Estudio de yacimientos.	50
2.2.1.4 Método de exploración Gravitacional	51
2.2.1.5 Método de exploración magnético.	51

2.2.1.6 Método de Teledetección.	52
2.2.1.7 Reconocimiento por perforación.	53
2.2.2 Técnicas de explotación de hidrocarburos	54
2.2.2.1 Perforación vertical.	54
2.2.2.2 Perforación Horizontal.	56
2.2.2.3 Perforación de largo alcance.	56
2.2.2.4 Perforación de orificio reducido.	57
2.2.2.5 Perforación con tubo enroscado.	58
2.3 ANTECEDENTES DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN COLOMBIA	58
3. METODOLOGIA	62
3.1 ORIGEN DE LA MUESTRA	63
3.2 CONTAMINACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL SUELO	63
3.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO	65
3.4 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS	66
3.5 RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)	68
3.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE MÉTODO DE CORTE DIRECTO	71
3.7 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS (CABEZA VARIABLE)	73
3.8 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS	75
Figura 29. Ajuste del dial en el equipo de consolidación.	76
3.9 LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO	77
3.10 LÍMITE PLÁSTICO DEL SUELO	78
3.11 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS	80
4. RESULTADOS OBTENIDOS A LO LARGO DEL TRABAJO: CARACTERIZACION MECANICA DE SUELOS ARCILLOSO	82

4.1 RESULTADOS SUELO NO CONTAMINADO.	83
4.2 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 5%	84
4.4 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 10%	86
4.5 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 15%	87
4.6 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 30%	89
5. ANALISIS DE RESULTADOS	91
5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO	92
5.2 ANALISIS DE LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO ARCILLOSO	93
5.2.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	94
5.2.2 Porcentajes de Variación de acuerdo con la variable tiempo: 15 y 55 días	96
5.3 ANALISIS DE LÍMITE PLÁSTICO DEL SUELO ARCILLOSO	98
5.3.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	99
5.3.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días	100
5.4 RESPECTO A LOS ENSAYOS DE LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO	103
5.5 LÍMITE DE CONTRACCION DEL SUELO ARCILLOSO	106
5.5.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	106
5.5.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días	109
5.6 ANALISIS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA EN SUELO ARCILLOSO	112
5.6.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	112
5.6.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días	114
5.7 ANALISIS DE PROCTOR MODIFICADO EN EL SUELO ARCILLOSO	117
5.7.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	117
Figura 44 Resultados de Humedad óptima de todas las muestras de suelo	119

5.7.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días	119
5.8 ANALISIS DE CORTE DIRECTO EN EL SUELO ARCILLOSO	121
5.8.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	121
5.8.2 Variación de los resultados respecto al tiempo 15 y 55 días	125
5.9 ANALISIS DE PERMEABILIDAD EN EL SUELO ARCILLOSO	127
5.9.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.	127
5.9.2 Variación del coeficiente de permeabilidad respecto al tiempo 15 y 55 días	131
5.10 ANALISIS DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL EN EL SUELO ARCILLOSO	134
6. CONCLUSIONES	138
7. RECOMENDACIONES	147
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	148
ANEXOS	153

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 sistemas existentes de clasificación de suelos	32
Figura 2. Cartas de plasticidad del sistema FAA	34
Figura 3. Cartas de plasticidad usada actualmente en el sistema USCS	37
Figura 4. Trampa estructural tipo falla	45
Figura 5. Trampa estructural tipo desnivel	45
Figura 6. Estudio sísmico	47
Figura 7. Como trabaja un Estudio sísmico	48
Figura 8. Estudio sísmico costa afuera	49
Figura 9 Imagen satelital.	53
Figura 10. Mapa de las principales cuencas de hidrocarburos del país	60
Figura 11. Suelo ajustado con 45% de SC y 55% de caolín	62
Figura 12. Inicio Mezcla del suelo mediante batidora	64
Figura 13. Suelo totalmente mezclado con la batidora	64
Figura 14. Proceso de mezclado del suelo con el hidrocarburo	65
Figura 15. Deposito del suelo dentro del picnómetro	66
Figura 16. Picnómetro con suelo contaminado impermeable	67
Figura 17. Rotación de picnómetro con suelo impermeable	67
Figura 18. Suelo después de 24 horas de secado.	68
Figura 19. Secado del suelo mediante hornilla eléctrica	69
Figura 20. Compactación de suelo mediante martillo de hierro.	70
Figura 21. Suelo compactado con martillo de hierro.	70
Figura 22. Compactación terminada por disminución de volumen.	71
Figura 23. Muestra de suelo dentro de caja de corte directo.	72
Figura 24. Diales maquina de corte.	72
Figura 25. Muestra fallada y retirada de la caja de corte directo.	73

Figura 26. Introducción de molde mediante gato hidráulico.	73
Figura 27. Pastilla de permeabilidad extraída mediante corcho de plástico.	74
Figura 28. Montaje terminado de Equipo de permeabilidad	75
Figura 29. Ajuste del dial en el equipo de consolidación.	76
Figura 30. Formación de pasta con suelo contaminado	77
Figura 31. Mezcla de suelo impermeable.	77
Figura 32. Elaboración de muestras para límite plástico.	79
Figura 33. Expulsión de hidrocarburo durante la mezcla.	79
Figura 34. Pastillas de contracción secas.	81
Figura 35. Resultado Análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado	92
Figura 36 resultados de límite líquido de suelos contaminados y Sn	96
Figura 37 porcentajes de variación de los resultados de Límite líquido respecto al tiempo: 15 y 55 días	98
Figura 38 resultados de límite líquido de suelos contaminados y Sn	100
Figura 39 Grafico del porcentaje de variación del límite Plástico entre tiempos respecto a 15 días	102
Figura 40 Resultados de límite de contracción y relación de contracción partiendo del tiempo de exposición tiempo	108
Figura 41 porcentajes de variación de los resultados de Límite de Contracción y relación de contracción respecto al tiempo	110
Figura 42 Resultados de Gravedad Específica de todas las muestras de suelo	114
Figura 43 porcentajes de variación del peso específico respecto al tiempo	116
Figura 44 Resultados de Humedad óptima de todas las muestras de suelo	119
Figura 45 Porcentajes de variación de la humedad óptima respecto al tiempo	121
Figura 46 Resultados de Resistencia al corte de los todas las muestras de suelo	124
Figura 47 Resultados de n_T/n_{20} para todas las muestras de suelo	129
Figura 48 Resultados de K_T y K_{20} para todas las muestras de suelo	130

Figura 49 comparaciones de resultados del K20 entre los tiempos 15 y 55 para cada porcentaje de contaminación	132
Figura 50 resultados de consolidación para todas las muestras de suelo	137

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sistema de clasificación de suelos AASHTO	39
Tabla 2. capacidad de cambio de cationes y aniones en arcillas	42
Tabla 3 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso sin contaminar	83
Tabla 4 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 5% de crudo	85
Tabla 5 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 10% de crudo	86
Tabla 6 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 15% de crudo	88
Tabla 7 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 30% de crudo	89
Tabla 8 Resultado de análisis granulométrico por tamices	92
Tabla 9. Porcentaje de variación del límite líquido realizados a todas las muestras de suelo respecto al suelo sin contaminar.	94
Tabla 10 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo	97
Tabla 11. Porcentaje de variación del límite plástico realizados a todas las muestras de suelo respecto al suelo sin contaminar.	99
Tabla 12 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo	101
Tabla 13 diferencia del contenido de agua entre suelos contaminados con el mismo porcentaje de crudo	103
Tabla 14. Indicación de plasticidad de los suelos	104
Tabla 15 índice de plasticidad de acuerdo a cada espécimen de suelo	104
Tabla 16 Clasificación del suelo	105
Tabla 17 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo Sn para todas las muestras de suelo	106

Tabla 18 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo	109
Tabla 19 resultados de precisión del ensayo límite de contracción	111
Tabla 20 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica respecto Sn para todas las muestras de suelo	112
Tabla 21 porcentaje de variación entre tiempos	115
Tabla 22 Valores típicos de Gravedad Específica	116
Tabla 23 Porcentajes de Variación de los resultados de humedad óptima respecto Sn para todas las muestras de suelo	118
Tabla 24 porcentaje de variación entre tiempos	119
Tabla 25 Porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte respecto a Sn para todas las muestras de suelo	122
Tabla 26 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo	125
Tabla 27 porcentajes de Variación de los resultados de Permeabilidad respecto Sn para todas las muestras de suelo	127
Tabla 28 porcentajes de variación de K_{20} respecto a la variable tiempo	131
Tabla 29 valores típicos para suelos saturados	133
Tabla 30 de valores relativos de permeabilidad	134
Tabla 31 comparación de los porcentajes de variación Cv respecto al suelo sin contaminar	135

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Con respecto al Ensayo modificado de compactación	153
Anexo B con respecto a la Gravedad Específica de los suelos	155
Anexo C Con respecto a la Determinación Límite líquido de los suelo	157
Anexo D Con respecto a la Determinación del Límite plástico de los suelos	159
Anexo E. Con respecto a la Determinación de los factores de contracción	160
Anexo F. Con respecto a la Determinación de la resistencia al corte	161
Anexo G. Con respecto a la Permeabilidad de los suelos	1688
Anexo H. Con respecto a la Consolidación unidimensional de los suelos	17070

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS ARCILLOSOS AFECTADOS POR DERRAMES SUPERFICIALES DE HIDROCARBUROS EN CONCENTRACIÓN POR PORCENTAJE EN PESO: 5, 10, 15 y 30

AUTORES: NAZLY JULLYET GALINDO ORTIZ
CARLOS AUGUSTO RUEDA BRAVO

FACULTAD: INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR: MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

PALABRAS CLAVES: hidrocarburos, crudo, propiedades mecánicas- caracterización mecánica, suelos, contaminación, arcillas.

El aumento continuo en la demanda de hidrocarburos ocasiona la expansión de las industrias petroleras y por consiguiente la explotación del mismo, lo que genera un riesgo para el suelo que puede verse afectado por un derrame de hidrocarburo, ya sea por motivos accidentales, de inexperiencia o de acciones delictivas. El recurso suelo es indispensable en el sector constructivos y por eso debe ser cuidado.

Este proyecto se centró en el análisis de las variaciones de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos afectados por derrame de crudo, evaluando los efectos en los cambios a los 15 días y 55 días posteriores a la contaminación. Los ensayos se realizaron de acuerdo a las especificaciones técnicas del Invias: norma INVE-07.

El suelo arcilloso inorgánico se ajustó de acuerdo a los siguientes porcentajes: 55% de caolín y 45% de suelo SC (arena arcillosa). Posteriormente se sometió el suelo a los ensayos de granulometría, límite líquido y límite plástico, con el fin de garantizar la naturaleza arcillosa del suelo de estudio. Después de esto se mezcló el suelo con diferentes concentraciones de crudo, suministrado por el ICP. La contaminación del suelo se realizó, de acuerdo a los siguientes porcentajes en peso: 5%, 10%, 15% y 30%. Luego se dejó en reposo el material contaminado durante 15 y 55 días para finalmente realizar los ensayos a los diferentes especímenes

Los ensayos que se realizaron a las diferentes muestras de suelo fueron los siguientes:

Gravedad específica de suelos (I.N.V. E – 128 – 07)

Límite líquido (I.N.V. E – 125 – 07)

Límite plástico (I.N.V. E – 126 – 07)

Límite contracción (I.N.V. E – 127 – 07)

Permeabilidad (I.N.V. E – 130 – 07)

Proctor modificado (I.N.V. E – 142 – 07)

Corte directo (I.N.V. E – 154 – 07)

Consolidación (I.N.V. E – 151 – 07)

Los suelos contaminados sufrieron variaciones en sus propiedades físico-mecánicas, y muestran cambios que se deben a las diferentes concentraciones de crudo presentes en el suelo y a los tiempos de exposición seleccionados

ABSTRACT

TITLE: MECHANICAL CHARACTERIZATION OF CLAY SOILS AFFECTED BY SUPERFICIAL HIDROCARBON SPILLS IN WEIGHT PERCENT CONCENTRATION OF: 5, 10, 15 AND 30.

Authors: NAZLY JULLYET GALINDO ORTIZ
CARLOS AUGUSTO RUEDA BRAVO

FACULTY: CIVIL ENGINEERING

DIRECTOR: MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

KEY WORDS: Clay soils, hydrocarbon spills, superficial hydrocarbon spills, soil pollution, clay, crude oils, crude, mechanical properties, mechanical characterization.

The continuous increase in oil/hydrocarbon demand causes the expansion of the oil industry and therefore the operation thereof; which creates a risk to the soil that can be affected by an oil/hydrocarbon spill, either by criminal actions or accidental reasons due to inexperience. Soil resources are essential to the construction industry and therefore it should be protected.

This project was dedicated to analyzing the different variations in the mechanical properties of clay soils affected by oil spill, evaluating the effects in changes at 15 and 55 days after the contamination had taken place . Assays were performed according to the technical specifications of Invias:INVE-07

The inorganic clay soil was adjusted according to the following percentages: 55% kaolin and 45% of SC soil (clayey sand). The soil was subsequently subjected to the tests of granulometry, liquid limit and plastic limit In order to guarantee the clayey nature of the soil in question. Thereafter the soil was mixed with different concentrations of oil provided by the ICP. Soil contamination was performed according to the following percentages by weight: 5%, 10%, 15% and 30%. Then the contaminated material was left to rest for 15 and 55 days to finally carry out the tests to the different samples.

The tests performed were as follows:

Specific gravity of soils(I.N.V. E – 128 – 07)

Liquid limit (I.N.V. E – 125 – 07)

Plastic limit (I.N.V. E – 126 – 07)

Contraction limit (I.N.V. E – 127 – 07)

Permeability (I.N.V. E – 130 – 07)

Modified proctor (I.N.V. E – 142 – 07)

Direct cut (I.N.V. E – 154 – 07)

Consolidation (I.N.V. E – 151 – 07)

The contaminated soils suffered variations in their physical and mechanical properties, and therefore show changes that are due to the different concentrations of oil in the soil and the selected exposure times.

INTRODUCCIÓN

Mundialmente el área de la construcción encargada de la realización de obras de infraestructura para el desarrollo social se ha encargado del mayor consumo de recursos naturales , hoy en día se están creando tendencias para minimizar el impacto causado al ambiente mediante la renovación y conservación de los recursos utilizados.

El suelo un elemento frágil y fuente de materias primas en todo el mundo, es considerado como un recurso no renovable debido a que el tiempo necesario para su formación y regeneración tarda demasiado en comparación a lo que le lleva degradarse , deteriorarse y destruirse. ¹

Uno de los recursos energéticos mas importantes como lo es el petróleo puede llegar convertirse en una problemática ambiental por su inadecuada explotación, problemas en su transportación o influencia de terceros mal intencionados. Ocasionando derrames de hidrocarburos, una de las principales causas de contaminación y degradación en los suelos

Existen pocos estudios relacionados a la afectación de los derrames en las características mecánicas naturales del suelo y la variación de estas a medida que avanza el tiempo de contaminación ; por esto, el desarrollo de este trabajo se enfatizo , en observar y analizar los cambios que se presentan en el suelo al momento de su contaminación, estudiando las variaciones a los 15 y 55 días de ocurrido el derrame.

¹ ORTIZ BERNAD, Irene ., et al. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. En: Informe de vigilancia tecnológica [en línea] . No.6 (2007). [consultado en 1 . jul. 2012] Disponible en <http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf>

En el presente estudio, se lograron caracterizar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos no contaminados y la variación de las mismas cuando se presenta una contaminación por peso en concentraciones de 5, 10 ,15 y 30 por ciento.

1. GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la expansión de las industrias petroleras, el aumento en la explotación del petróleo y derrames de hidrocarburos ha aumentado significativamente en los últimos años en Colombia esto se ve reflejado en que “El año pasado, la industria petrolera en el país contaba con cerca de 150 equipos para perforación. A la fecha hay los 214. Un indicador que refleja el crecimiento de la industria de los hidrocarburos en el territorio colombiano”² hecho que desfavorece las condiciones naturales del suelo que se ve afectado por la contaminación lo cual causa un deterioro en el recurso suelo.

Los terrenos que se ven expuesto a la contaminación producida por hidrocarburos presentan alteraciones en sus propiedades físicas y químicas lo cual genera danos a este recurso. Es por ello que se debe investigar y determinar los cambios que sufren estas superficies generadas por los procesos de explotación, conducción y almacenamiento del sector petrolero con el fin de evaluar la capacidad de estos suelos contaminados.

Es vital aclarar que el suelo es un recurso imprescindible en la ingeniería civil es por ello que este debe ser valorado como tal y por consiguiente nace la necesidad de cuidarlo. Cuando este recurso se ve afectado por derrames de hidrocarburos

²SANTAMARIA DAZA, Ricardo. Oferta de taladros petroleros en Colombia aumentó más de 40 por ciento este año. [en línea]. [consultado 13nov.2010]. Disponible en <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:OJx3aSLRKeIJ:www.oilproduction.net/cms/index.php%3Foption%3Dcom_content%26view%3Darticle%26id%3D1445:oferta-de-taladros-petroleros-en-colombia-aumento-mas-de-40-por-ciento-este-ano%26catid%3D53:notas-de-opinion%26Itemid%3D110+aumento+la+industria+petrolera+en+colombia&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=CO>

este sufre variaciones que alteran su estructura es por ello que se deben analizar en este proyecto los cambios en los principales tipos de suelo y más en un país como Colombia que aún no tiene mucho recorrido en estos temas.

1.2 ALCANCE

El proyecto evalúa los cambios en las propiedades mecánicas de suelos arcillosos afectados por derrame de hidrocarburos comparando las propiedades de estos terrenos antes y después de la contaminación de este recurso. Para garantizar la naturaleza arcillosa del suelo y con el fin de controlar la clasificación de suelo arcilloso, se ajustará un material de suelo, caracterizado previamente, de composición inicial SC y posteriormente, se añadirá un 55% de caolín y 45% de suelo; con esto, se espera garantizar una composición arcillosa del material de estudio a lo largo de las pruebas realizadas. Es importante destacar que las proporciones de caolín y suelo fueron verificadas previamente a la formulación de esta propuesta de trabajo.

En esencia, el alcance de este trabajo es la identificación de las variaciones en las propiedades mecánicas de suelos arcillosos afectados por derrames de hidrocarburos, partiendo de concentraciones del 5, 10, 15 y 30% en porcentaje en peso de suelo seco preparado, luego de 15 y 55 días ocurrida la contaminación. Estudios similares, se están abordando con otros tipos de suelo al interior del grupo de Investigación DeCoR.

Los ensayos que se realizaron al suelo son:

Gravedad específica de suelos (I.N.V. E – 128 – 07)

Granulometría (I.N.V. E – 123 – 07)

Límite líquido (I.N.V. E – 125 – 07)

Límite plástico (I.N.V. E – 126 – 07)

Límite contracción (I.N.V. E – 127 – 07)

Permeabilidad (I.N.V. E – 130 – 07)

Proctor modificado (I.N.V. E – 142 – 07)

Corte directo (I.N.V. E – 154 – 07)

Consolidación (I.N.V. E – 151 – 07)

1.3 JUSTIFICACION

La industria de explotación y procesamiento de hidrocarburos implica la intervención del recurso suelo, y exige la distribución del producto procesado por diferentes entornos, la mayoría de ellos nuevamente en el suelo. En esencia, la contaminación en las estructuras de suelo debido a la explotación de petróleo y su transporte es claramente un tema de gran relevancia, ya que la presencia de hidrocarburos en los suelos puede afectar las propiedades del terreno. A nivel Colombia han sido comunes los derrames de crudo por acciones criminales y en ocasiones por fallas técnicas en los oleoductos. Por tal razón, este proyecto aportará la industria y a la academia en la determinación de las variaciones mecánicas en los suelos arcillosos con miras a que en estudios posteriores se evalúen las alternativas de remediación.

Al presentarse un derrame de crudo en el suelo se producen un impacto negativo en las condiciones naturales del terreno; por ello, es necesario conocer las propiedades mecánicas que se afectan durante estos derrames para definir si se requiere una intervención o remediación inmediata o si el tratamiento de recuperación de suelo puede posponerse. Lo anterior, por lo tanto justifica la ejecución de este tipo de estudios.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General.

Evaluar las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso afectado por un derrame superficial de hidrocarburo.

1.4.2 Objetivos específicos.

Caracterizar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso no contaminado.

Determinar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso contaminado por hidrocarburos con concentración en porcentaje por peso de 5, 10, 15 y 30.

Evaluar los cambios obtenidos en las propiedades mecánicas de suelos afectados por derrames superficiales de la industria petrolera

1.5 RELEVANCIA DEL ESTUDIO

En el ejercicio de la exploración de yacimientos para explotación de hidrocarburos puede ocurrir que los mismos estén localizados en suelos de diferente clasificación. Por lo tanto, una vez se inician las actividades de producción con el consecuente transporte, atraviesen también suelos arenosos, arcillosos, limosos, orgánicos o una mezcla de éstos. Este estudio responde a una necesidad del sector hidrocarburo, quienes solicitaron al grupo DeCoR la búsqueda de alternativas para el aprovechamiento de ceniza proveniente de locaciones petroleras. En este caso, al grupo de estudiantes que participó en la investigación le correspondió la evaluación en los cambios en suelos arcillosos afectados por derrames de hidrocarburo. Es importante destacar que existen otros tipos de

suelos que serán estudiados posteriormente. Una vez se evalúen los distintos casos, en estudios posteriores se plantearán estrategias de recuperación de suelos para las distintas aplicaciones de infraestructura

1.6 ORGANIZACIÓN

El presente trabajo se encuentra distribuído en nueve capítulos de la siguiente forma: en el capítulo 1 se encuentra la introducción, justificación, planteamiento del problema, alcance, objetivos y relevancia del estudio.

El capítulo 2 está conformado por las bases teóricas requeridas para el desarrollo del trabajo, las cuales comprenden; teoría de los suelos, métodos de clasificación, exploración y explotación de hidrocarburos, antecedentes de derrames de hidrocarburos en Colombia.

La metodología se describe en el capítulo 3. Posteriormente en el capítulo 4 y 5 se incluyen todos los resultados cuantitativos obtenidos de los respectivos ensayos y su análisis

Finaliza el informe con las conclusiones seguidas de recomendaciones realizadas respecto a los métodos empleados y finalmente la sección de Referencias Bibliográficas

2. MARCO TEORICO

Los diferentes mecanismos de exploración y extracción del petróleo se hacen a través del suelo, el cual puede verse afectado por la contaminación de crudo; ya sea, en el procesamiento, almacenamiento o distribución del mismo. El terreno afectado puede producir cambios importantes en su estructura; por lo tanto, es necesario reconocer las características mecánicas de los suelos.

Es importante Conocer acerca de los métodos de clasificación de suelos porque proporcionan la máxima información normativa, a partir de la cual los interesados en el tema sabrán en qué dirección profundizar su investigación³, con el fin de poder reconocer el comportamiento físico-mecánico del suelo en uso. La clasificación del suelo es primordial en el proceso de dirigir una investigación detallada ya que permite realizar la caracterización de un suelo específico.

Así mismo, la presentación de las técnicas de exploración y explotación de hidrocarburos permiten conocer el funcionamiento de estos mecanismos en nuestro medio los cuales intervienen principalmente en la contaminación del suelo.

Finalmente, es esencial exponer la realidad que aqueja a Colombia por las voladuras de oleoductos, favoreciendo de manera los derrames sobre suelos de diferentes tipos, hecho que produce cambios importantes en el comportamiento de los suelos. Por lo tanto, es necesario realizar la respectiva valorización de las propiedades mecánicas de los terrenos afectados. Específicamente en este estudio, se abordó el suelo arcilloso, y en estudios posteriores se abordarán otros;

³ JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tomo 1. México D.F: Limusa S.A. De C.V. Grupo Noriega Editores, 2005, p. 149.

con el fin, de describir las alteraciones en las características de terrenos afectados por los hidrocarburos.

2.1 TEORIA DE LOS SUELOS

El suelo es un material esencial en el área de la construcción, sin embargo, no recibe la suficiente atención. El hombre solo se ha preocupado por la explotación del recurso suelo, sin procurar su cuidado. La necesidad de intentar proteger estas superficies terrestres de contaminantes y aprovechamiento excesivo, se basa en la relación, entre suelo y recurso natural; lo que resalta la dependencia del hombre entre entorno y desarrollo, ya que, muchos de sus componentes son fundamentales, en el contexto de la infraestructura de datos espaciales⁴.

La interpretación de la palabra suelo puede variar, de acuerdo, a la labor de uso que se le dé en diferentes áreas. Por otra parte, se debe entender como concepto general que es un recurso natural y que es indispensable en el desarrollo del hombre y su entorno. Juárez y Rico⁵ opinan que el suelo es un conjunto con una organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”; Además que es un término del que hacen uso diferentes profesantes.

Toda definición sobre el suelo varía de acuerdo a los intereses; por ejemplo, el Agrónomo la interpreta como la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal; para el geólogo es todo material intemperizado en el lugar en que

4 MALAGON CASTRO, Dimas. Los Suelos de Colombia. En: Sociedad Geográfica de Colombia. [en línea]. [consultado 1 jul. 2012]. Disponible en <<http://www.sogeocol.edu.co/portit.htm>>, p. 1.
21

5 JUAREZ Y RICO, Op. Cit., p. 34.

ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de las superficies. Definiciones que son muy restringidas y parciales para la ingeniería⁶.

Según Juárez y Rico⁷ los agentes generadores de suelos son:

Desintegración mecánica: se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, ejemplo: cambio periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, etc.

Por descomposición química: se entiende la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. Cuyo agente más importante es el agua.

Aunque la corteza terrestre es atacada principalmente por el aire y el agua, siendo los medios de acción de estas sustancias sumamente variado; todos se incluyen en estos dos anteriores grupos. Además los mecanismos más importantes de ataque son: oxidación, la hidratación y la carbonatación.

2.1.1 Clasificación de suelos

“No es un secreto que el suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho el único material disponible localmente”⁸; por tal motivo, se genera la necesidad de investigar las propiedades físico-mecánicas del suelo. Para ello, es indispensable tener la capacidad técnica de clasificación y caracterización del mismo. Pues, según Lambe⁹ cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción debe seleccionar el tipo

6 Ibid., p. 32.

7 Ibid., p. 34.

8 LAMBE, William y WHITMAN, Roberth. MECANICA DE SUELOS. México D.F: Limusa: Noriega Editores, 1994. P. 19.

9 Ibid., p. 19.

adecuado de suelo, así como el método de colocación y, luego, controlar su colocación en la obra; para ello, es imprescindible reconocer el comportamiento del suelo que está utilizando en obra.

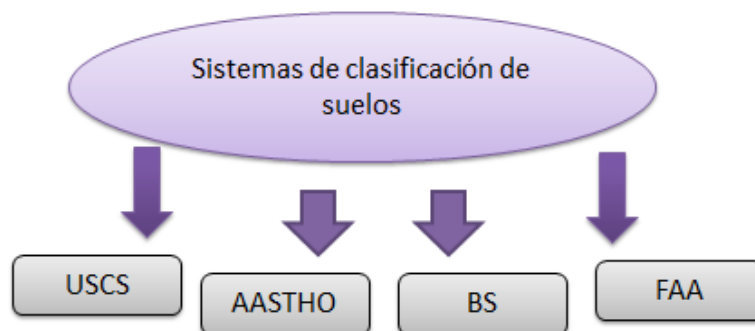
Si bien un sistema de clasificación de suelos debe describir de manera cualitativa las propiedades de un suelo determinado, con el fin, de mostrar al ingeniero, con respecto al tipo de suelo que se está utilizando y afrontando

2.1.2 Sistemas de clasificación de suelos

Los sistemas de clasificación de suelos permiten describir las diferencias en las propiedades de un suelo con respecto a otro. Una vez hecha esta precisión es importante nombrar los cuatro tipos de sistemas de clasificación que existen. Estos son:

- Sistema unificado de Clasificación de Suelos USCS (Figura 1)
- American Association of state Highway AASTHO
- Sistema Británico (BS) este sistema no se especifica por el poco uso que se le da.
- Sistema de clasificación de aeropuertos FAA

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. **Sistemas existentes de clasificación de suelos**



Fuente¹⁰

Sistema de clasificación de Aeropuertos (FAA)

Este sistema fue propuesto por Casagrande en 1942 y se adoptó principalmente a la construcción de aeropistas. Sin embargo más tarde fue ligeramente modificado para constituir el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos¹¹

El sistema divide a los suelos en dos grandes grupos:

Gruesos: son aquellos cuyo tamaño es inferior a la abertura del tamiz No 4 y superior a la abertura del tamiz No 200

Estos se dividen en:

Arenas y gravas (estas se separan por la malla No 4)

Existen grupos adicionales dentro de estos, en relación a la gradación, al contenido finos y la plasticidad del mismo.

Finos: son aquellos que pasan por la malla No 200

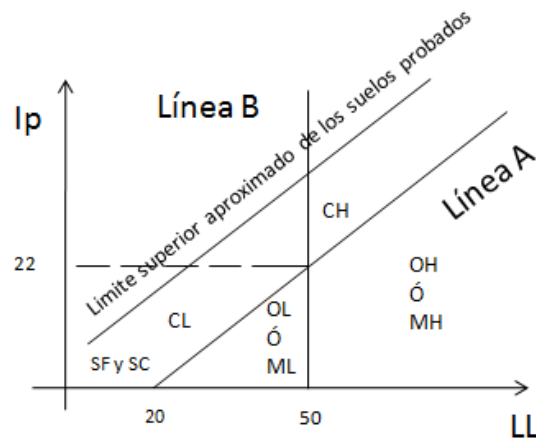
Existen grupos adicionales dentro de estos, con respecto a su plasticidad.

La carta de plasticidad que se usaba en el método FAA es la siguiente (Figura 2):

¹⁰ CLASIFICACION DE SUELOS. [en línea]. [consultado 28 jun. 2012]. Disponible en <icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases.../05_terzaghi_3.pdf>, p. 2. 20

¹¹ JUAREZ Y RICO, Op. Cit., p. 150

Figura 2. Cartas de plasticidad del sistema FAA



Carta de plasticidad, como se usó en el sistema de Aeropuertos

Fuente copia fiel de¹²

Sistema unificado de Clasificación de Suelos USCS¹³

Este sistema es basado en el de Aeropuertos, el cual, cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiéndose ambos por el cribado a través de la maya 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores.

El suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas

Grupos referentes:

Suelos gruesos:

Gravas: G, el suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fractura gruesa (retenida en la malla 200) no pasa por la malla No 4

Arenas: S, es el caso contrario en las arenas con respecto a la gravas

¹² JUAREZ Y RICO, Op. Cit., p. 152

¹³ Ibid., p. 152-155

Un material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Su símbolo es W. en combinación con los símbolos genéricos: GW Y SW.

Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Su símbolo es P. En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.

Material con cantidad apreciable de finos no plásticos, su símbolo M. en combinación con los símbolos genéricos: GM y SM

Material con cantidad apreciable de finos plásticos, su símbolo C. en combinación con los símbolos genéricos: GC y SC

GW y SW

El contenido de partículas finas no puede ser mayor de un 5% en peso.

Una grava bien graduada exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4, mientras que el de curvatura debe estar entre 1 y 3.

Una arena bien graduada, el coeficiente de uniformidad será mayor que 6, en tanto el de curvatura debe estar entre los mismos límites anteriores.

GP y SP

En laboratorio, deben satisfacer los requisitos señalados anteriormente por los dos grupos anteriores, en lo referente a su contenido de partículas finas, pero no cumplen los requisitos de graduación indicados para su consideración como bien graduados.

GM y SM

Estos grupos el contenido de finos afecta las características de resistencia y esfuerzo- deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa; en la

práctica se ha visto que esto ocurre para porcentajes de finos superiores al 12%, en peso, por lo que esa cantidad se toma como frontera inferior de dicho contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos en estos grupos varía entre “nula” y “media”; es decir, es requisito que los límites de plasticidad localicen a la fracción que pase la malla No 40 abajo de la línea A o bien que su índice de plasticidad sea menor que 4.

GC y SC

Como antes, el contenido de finos de estos grupos de suelos debe ser mayor que 12%, en peso, y por las mismas razones expuestas para los grupos GM y SM. Sin embargo, en estos casos, los finos son de media a alta plasticidad; es ahora requisito que los límites de plasticidad estén a la fracción que pase la malla No 40 sobre la línea A, teniéndose, además, la condición de que el índice plástico sea mayor que 7.

A los suelos gruesos con contenido de finos entre 5% y 12%, en peso, el sistema unificado los considera casos de frontera, adjudicándoles un símbolo doble.

Cuando un material no cae claramente dentro de un grupo, deberán usarse también símbolos dobles, correspondientes a casos de frontera.

SUELOS FINOS

También este sistema considera a los suelos agrupados y da lugar a las siguientes divisiones:

Limos inorgánicos, de símbolo genérico M

Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C

Limos y arcillas orgánicas, símbolo genérico O

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdivide, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L, obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor de 50%, ósea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H, teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

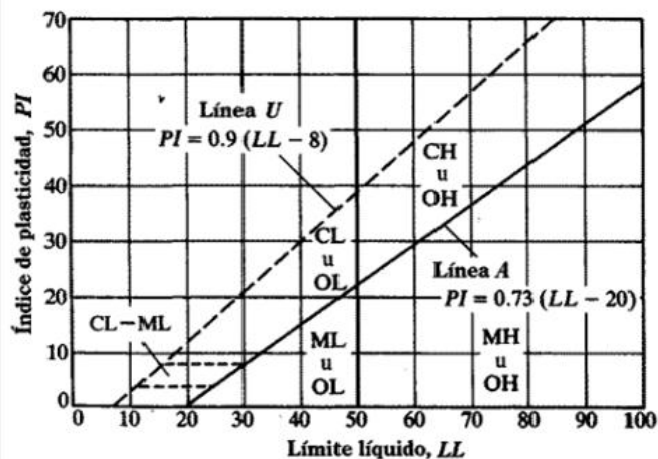
Las zonas correspondientes a OL y OH son las mismas que las de los grupos ML y MH, respectivamente si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A.

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo Pt.

CARTA DE PLASTICIDAD:

Por medio de la carta de plasticidad se obtiene el símbolo de cada letra, que se refiere al tipo de suelo fino al que pertenece la respectiva clasificación (figura 3).

Figura 3. Cartas de plasticidad usada actualmente en el sistema USCS



Fuente Copia fiel de ¹⁴

American Association of state Highway AASTHO

Este sistema se introdujo en 1929, siendo uno de los primeros sistemas de clasificación; cuyo fin era evaluar los suelos sobre los cuales se construían las carreteras. En 1945 se modifico y desde entonces se conoce como AASHO y recientemente AASHTO¹⁵.

El sistema de clasificación AASTHO 16 describe un procedimiento para clasificar suelos en siete grupos, basado en las determinaciones de laboratorio de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. La evaluación en cada grupo se hace mediante un "índice de grupo", el cual se calcula por la fórmula empírica:

$$IG = (F - 35) (0,2 + 0.005 (WI - 40)) + 0,01 (F - 15) (IP - 10).$$

En la que:

F = Porcentaje que pasa por 0.08 mm, expresado en números enteros basado solamente en el material que pasa por 80 mm.

WI = Límite Líquido.

IP = Índice de Plasticidad.

Se informa en números enteros y si es negativo se informa igual a 0.

Disponiendo de los resultados de los ensayos requeridos, se va a la Tabla 1 de izquierda a derecha y el grupo correcto se encontrará por eliminación. El primer

¹⁴ SISTEMA DE CLASIFICACION de suelos unificado. En: Ingeniero Civil. [en línea]. [consultado 3 jul. 2012]. Disponible en <http://www.ingenieriaciviltips.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos_13.html>

¹⁵ MECANICA DE SUELOS. [en línea]. [consultado 1 jul. 2012]. Disponible en <<http://www.tmp.ucn.cl/Facultades/Institutos/laboratorio/aashtoM2.htm>>

¹⁶ Ibid.,

grupo desde la izquierda que satisfaga los resultados de las pruebas es la clasificación correcta.

Tabla 1. Sistema de clasificación de suelos AASHTO

SISTEMA DE CLASIFICACION AASHTO											
Clasif. General	Suelos Granulares ($\leq 35\%$ pasa 0.08 mm)						Suelos Finos ($> 35\%$ bajo 0.08 mm)				
Grupo	A - 1		A-3	A-3				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*				A-7-5**
2 mm	≤ 50										
0.5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0.08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35				≥ 36			
WI				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena fina	Gravas y Arenas Limosas y Arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
	** A - 7 - 5 : $IP \leq (w_L - 30)$						A - 7 - 6 : $IP > (w_L - 30)$				
	$IG = (B/0.08 - 35) (0.2 + 0.005 (w_L - 40)) + (B/0.08 - 15) (IP - 10) * 0.01$										
	$* \text{Para A - 2 - 6 y A - 2 - 7: } IG = (B/0.08 - 15) (IP - 10) * 0.01$										

Fuente copia fiel de ¹⁷

Todos los valores de límites debe ser enteros, si alguno es decimal debe redondearse al entero más cercano

El valor del índice de grupo debe ir siempre en paréntesis después del símbolo del grupo, como se muestra a continuación: A-2-6 (3); A-7-5 (17).

Grava es el material que pasa por 80 mm y es retenido en tamiz de 2; la arena gruesa es el material comprendido entre 2 mm y 0.5 mm; la arena fina es el material comprendido entre 0,5 y 0,08 mm y el limo arcilla es el material que pasa por tamiz 0,08 mm.

El suelo es un material granular si el 35% o menos pasa por el tamiz 0,08 mm

El término de material limoso se aplica a los suelos finos que tienen un índice de plasticidad mayor o igual a 11.

Los suelos limo-arcillosos son lo que, mas del 35% pasan por el tamiz No 200.

Cuando se calcula índices de grupo de los subgrupos A-2-6 y A-2-7, use solamente el término del índice de plasticidad de la fórmula.

Cuando el suelo es NP o cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar (0).

Si un suelo es altamente orgánico (turba) puede ser clasificado como A-8 sólo con una inspección visual, sin considerar el porcentaje bajo 0,08 mm, límite líquido e índice de plasticidad. Generalmente es de color oscuro, fibroso y olor putrefacto.

2.1.3 Importancia de los sistemas de clasificación de suelos, respecto a la caracterización de los mismo

Los métodos de clasificación de suelo permiten categorizar de manera cualitativa los diferentes tipos de suelo de acuerdo, con las propiedades mecánicas que

varían en cada grupo. Además un sistema útil de clasificación debe servir para normar el criterio del técnico respecto al suelo que se trate¹⁸, sin embargo no es suficiente para caracterizarlo, debido a la complejidad y prácticamente la infinita variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza.

En conclusion toda caracterizacion de suelo depende sustancialmente del tipo de suelo y el uso de éste en el campo de la construccion. Un ejemplo en general seria: “para el calculo de los asentamientos de un edificio, se mide la compresibilidad del suelo y se utiliza este valor en las ecuaciones basadas en la teoria de la consolidacion de Terzaghi”¹⁹. En este caso el suelo es sometido a la funcion de soporte de una estructura y para ello se necesita hallar el tipo de suelo, con base, en esto se realizan los respectivos ensayos que permitan la caracterización del mismo, detallando el comportamiento de éste como soporte estructural y especificando el cálculo de los asentamientos del suelo.

Suelo Arcilloso

El proyecto tiene como objetivo caracterizar un suelo ARCILLOSO el cual es sometido a una contaminación artificial de hidrocarburo a diferentes porcentajes por peso; por tal razón, es importante definir algunas propiedades de estos suelos.

Suelos Finos:

En los suelos de grano muy fino según Juárez y Rico²⁰ ejercen fuerzas de acción importantísima, debido a que en estos granos, la relación de área a volumen alcanza valores de consideración y fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales cobran significación. En general, se estima que esta actividad en la superficie de la partícula individual es fundamental para tamaños menores que dos micras.

ARCILLAS:

18 JUAREZ y RICO, Op. Cit., p. 149

19 LAMBE y WHITMAN, Op. Cit., p. 46.

20 JUAREZ y RICO, Op. Cit., p. 41.

Es importante reconocer la propiedades de las arcillas, en función de este proyecto; un dato interesante, es que estas “dependen en gran parte del tipo de mineral arcilloso que predomina y de las sustancias presentes en sus capas de absorción, se ve que dos arcillas granulométricamente idénticas pueden ser muy distintas en otros aspectos”²¹

La capacidad de cambio de cationes de un mineral describe su aptitud para absorber cationes, su valor se expresa en miliequivalente por 100 grs de suelo seco de acuerdo a la tabla 2.

Tabla 2. capacidad de cambio de cationes y aniones en arcillas

Arcilla	capacidad de cambio (Miliequivalente x100 g)	
	cationes	aniones
Caolinita	2,2 a 15	6,6 a 20,2
Halosita	10 a 50	60
Monmorillonita	75 a 150	23 a 31
Vermiculita	100 a 150	4

Fuente²²

“Los valores anteriores indican algunos valores de la capacidad de cambio de cationes y aniones, cuyos valores son muy orientativos a la hora de evaluar la capacidad de inchamiento potencial de un suelo arcilloso que resultan ser extremadamente peligrosos cuando tiene un elevado índice plástico y una capacidad de intercambio de cationes superiores a 25 meq x 100”²³. Al evaluar en un plano microfísico, las propiedades de las arcillas, se puede, obtener un

21 NADEO, Julio Roberto y LEONI, Augusto José. Introducción a Algunas Propiedades Fundamentales de los Suelos. [en línea]. [consultado 3 jul. 2012]. Disponible en < www.ing.unlp.edu.ar/.../...>, p. 18. de 62

22 Ibid., p. 18.

23 Ibid., p. 13.

comportamiento más detallado de las mismas en un espacio real. Lo que asegura la caracterización exitosa del suelo, claro está que eso depende directamente de su uso constructivo.

Cada partícula de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura²⁴. Durante mucho tiempo se creyó que los minerales de las arcillas eran de naturaleza amorfa, pero todas las investigaciones de detalle realizadas hasta ahora han demostrado, por el contrario, que son cristalinos y altamente estructurados. Las relaciones entre los cristales que componen las arcillas y el agua que los rodea han adquirido últimamente una importancia cada vez mas significativa, de la que se hace un uso reciente para explicar los comportamientos macrofísicos de las arcillas en las obras ingenieriles.²⁵

2.2 TEORÍA DE PRODUCCIÓN DE LOS HIDROCARBUROS

2.2.1 Sistemas de exploración de hidrocarburos

Condiciones rigurosas deben de estar vigentes para la existencia de una acumulación de hidrocarburos. Una de las primeras condiciones es que durante muchos años se hayan acumulado en un área un grupo adecuado de rocas, ésta se conoce como la cuenca sedimentaria. Dentro de dicha secuencia es necesario que exista un alto contenido de materia orgánica que con el paso de los años y la meteorización se convertirá en la roca madre. La roca madre será sometida a presiones y altas temperaturas para alcanzar una maduración, necesaria para que exista la expulsión de hidrocarburos de parte de esta. La migración describe el proceso por el el cual los hidrocarburos son transportados a un tipo de sedimento poroso, esta estructura se conoce como deposito rocoso. Solo si el depósito se

24 JUAREZ y RICO, Op. Cit., p. 41

25 Ibid., p. 44.

deforma en una condición favorable o si en sus laterales se encuentra con una formación impermeable forma una trampa para que ocurra la migración de hidrocarburos²⁶.

El objetivo de cualquier exploración es encontrar nuevos yacimientos de hidrocarburos a un bajo costo y en un corto periodo de tiempo. Los presupuestos de exploración están en competencia directa con las oportunidades de ganancias, si una compañía gasta más dinero buscando hidrocarburos de lo que gastaría comprándolos en el mercado común los incentivos de realizar la exploración serían mínimos, al contrario una compañía que gestiona la búsqueda de reservas a bajo costo tiene un margen competitivo desde que puede permitirse más exploraciones, búsqueda y explotación de depósitos mucho más rentables

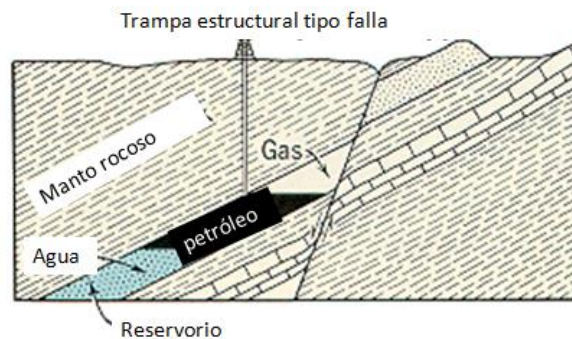
La secuencia usual de actividades una vez que se ha seleccionado un área para exploración comienza con la identificación de una cuenca. La cartografía de anomalías magnéticas y anomalías en la gravedad serán los primeros métodos aplicados. En muchos casos actualmente esa información estará disponible para el dominio público o podrá ser comprado como un estudio no exclusivo. Luego una gruesa red sísmica bidimensional, cubriendo una extensa área, se adquirirá con el propósito de definir fallas, áreas que muestran estructuras con alta probabilidad de contener una acumulación. Desde este punto muy pocos hechos concretos están disponibles para juzgar, investigaciones más detalladas serán integradas para definir un prospecto; una estructura bajo la superficie con probabilidades razonables de contener todos los elementos de una acumulación de petróleo.²⁷

26 Jahn, Frank; Cook, Mark & Graham, Mark. DEVELOPMENTS IN PETROLUM SCIENCE: HYDROCARBON EXPLORATION AND PRODUCTION. United kingdom: Elsevier Science, 1998. p.9. [Traducción]

27 Ibid., p.15.

Al comienzo de una exploración frecuentemente se observa y analiza la superficie del terreno donde se cree pueda existir un yacimiento de hidrocarburos. Es importante resaltar en el terreno las fallas presentes porque ellas indican potencialmente en donde podrían encontrarse una serie de trampas estructurales bajo la superficie en reservorios de rocas²⁸ Figura 4

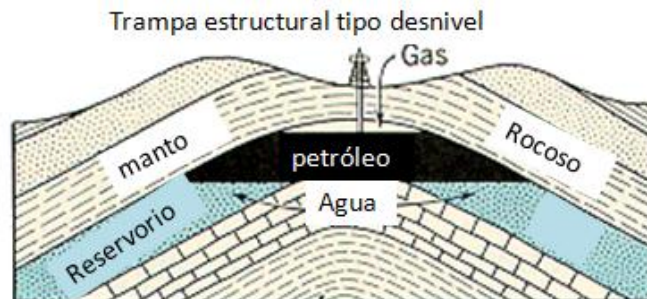
Figura 4. Trampa estructural tipo falla



Fuente: ²⁹

La observación de desniveles, otro tipo de trampa estructural, también indica trampas potenciales en las profundidades. Figura 5.

Figura 5. Trampa estructural tipo desnivel



Fuente: ³⁰

28 Hanson, Bradford & Bradley Robert, The Louisiana Department of Natural Resources, BLACK GOLD beneath the bayous [CD-ROM]: Version 1.0, 1999. [Traducción]

29 Trampa estructural tipo falla. [en línea]. 1999. [consultado 20 jun. 2012] disponible en <http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGGB/5/flint_525_2.gif> [Modificada]

El petróleo crudo naturalmente existente se filtra negreando el suelo y propaga películas en arco iris en los sondeos. Dichas evidencias tan directas son muy útiles, pero muchos de los lugares han sido identificados y explorados con anterioridad, entonces la exploración moderna de hidrocarburos debe innovar e implementar otras técnicas. Hay metodologías primarias usadas para encontrar hidrocarburos bajo la superficie como lo son la geofísica, la detección por sensor remoto, reconocimiento por perforación, estudios de campo, explotación lodosa entre otras.³¹

Las técnicas geofísicas usadas para la exploración del petróleo utilizan equipos de medición para fenómenos como: corrientes eléctricas, anomalías magnéticas gravimétricas, flujos de temperatura, relaciones geoquímicas y variaciones de densidad desde la superficie hasta las profundidades de la tierra. Cada técnica registra un grupo diferente de características las cuales pueden ser usadas para localizar hidrocarburos debajo de la superficie terrestre.³²

2.2.1.1 Estudios sísmicos. Utilizan la vibración (inducida por una carga explosiva o un equipo de ultrasonido) para proveer una Figura de las formaciones rocosas subterráneas, a menudo a profundidades de 30,000 pies debajo del nivel de suelo, esto es llevado a cabo mediante la generación de ondas sonoras hacia abajo en la corteza terrestre en los que se refleja los límites entre los diferentes estratos de roca. En tierra, las ondas sonoras son generadas por pequeñas cargas explosivas introducidas en la tierra o por camiones vibradores algunas veces referenciados como vibro compactadores los que sacuden el suelo mediante paneles metálicos accionados³³.

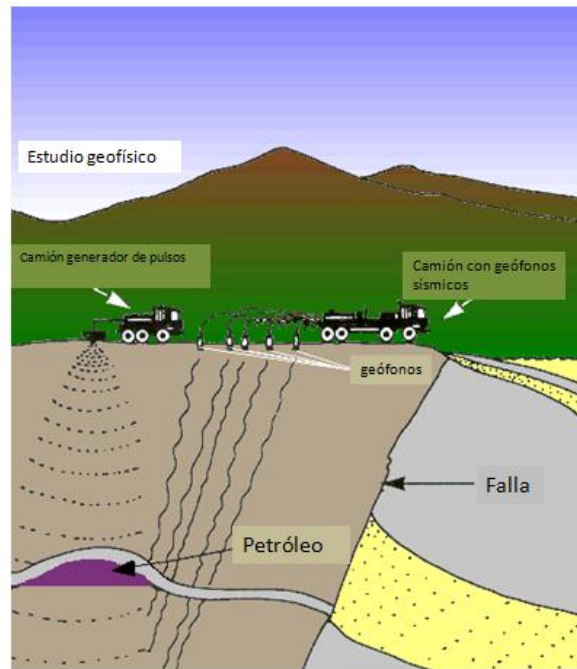
30 Trampa estructural tipo desnivel. [en línea]. .1999. [consultado 20 jun.2012] disponible en <http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGGB/5/flint_525_1.gif> [Modificada]

31 Ibid.,

32 Hanson, Bradford & Bradley Robert, Op.cit., [Traducción]

33 Ibid.,

Figura 6. Estudio sísmico

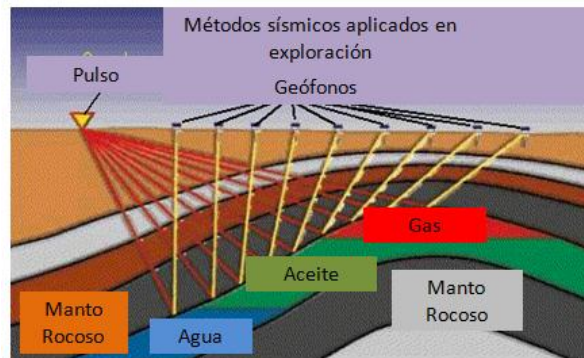


Fuente: ³⁴.

El oído humano apenas puede oír el golpe, pero la frecuencia generada penetra la corteza terrestre, los ecos son detectados por medios electrónicos llamados geófonos los cuales reciben las ondas sonoras reflejadas y los datos son registrados en una cinta magnética la cual es impresa para producir una gráfica bidimensional ilustrando la geología bajo la superficie Figura 7.

³⁴ Estudio geofísico. [en línea]. .1999. [consultado 20 jun.2012] disponible en < http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGBB/5/nef_9_a.gif > [Modificada]

Figura 7. Como trabaja un Estudio sismico



Fuente: ³⁵

Los estudios costa afuera son llevados a cabo de una manera ligeramente diferente. Botes arrojan al agua cables que contienen hidrófonos, que son similares a los geófonos en tierra. Las ondas sonoras solían ser creadas con dinamita, pero este método destruía variedad de vida marina. El método más aceptado hoy en día para la generación de estas ondas sonoras es mediante pulsos de aire comprimido, el cual crea grandes burbujas que estallan bajo la superficie del agua creando sonido. Las ondas sonoras viajan hasta el suelo marítimo penetrando bajo las rocas, y regresa a la superficie donde son interceptadas por los hidrófonos. Posteriormente, se procesa la información de la misma forma que se hace sobre el suelo seco. **36**

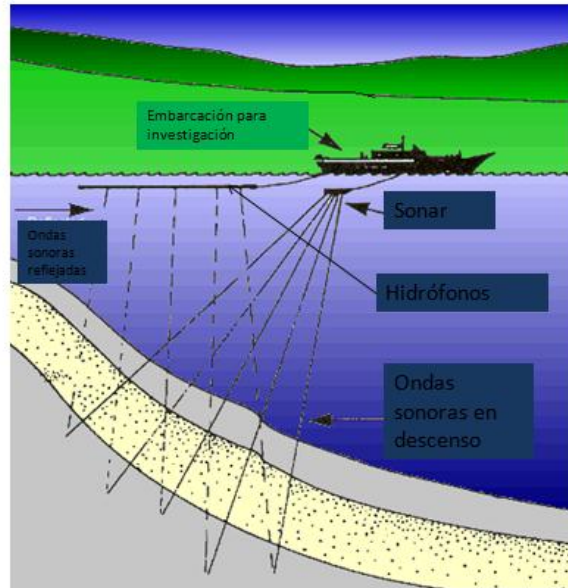
En este tipo de estudio, las ondas sonoras son enviadas a la tierra donde son reflejadas por las distintas capas de roca (Figura8) El tiempo que les toma regresar a la superficie es medido en función del tiempo, estas medidas revelan que tan profundo están las capas de suelo reflectoras; entre más grande el intervalo de tiempo, más profunda la capa rocosa. Por otra parte, esta técnica

³⁵ Estudio sísmico en acción. [en línea] . 1999. [consultado 20 jun.2012] disponible en <http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGGB/5/sensing_legend.html> [Modificada]

³⁶ Hanson, Bradford & Bradley Robert, Op.cit[Traducción]

también puede determinar qué tipo de roca está presente ya que las rocas transmiten ondas sonoras diferentes.³⁷

Figura 8. Estudio sísmico costa afuera



Fuente: ³⁸

Los más sofisticados estudios sísmicos son realizados en tres dimensiones. Los datos recolectados son procesados por un computador y el resultado es una imagen detallada en 3D de las formaciones y estructuras debajo de la superficie. Este proceso es costoso, en el orden de los 30.000 dólares por milla(año)). Pero perforar un pozo puede costar miles de millones de dólares, por lo que el tiempo y el dinero gastados en estudios sísmicos precisos son una buena inversión desde que ayudan a localizar fuentes nuevas y minimizar los pozos secos, en general los estudios sísmicos pueden ser llevados a cabo sin perturbar a las personas o dañar el medio ambiente, donde sea que se lleven a cabo en tierra o en el agua, son una

37 Hanson, Bradford & Bradley Robert, Op.cit., [Traducción]

38 Estudio sísmico costa afuera. [en línea] . 1999. [consultado 20 jun.2012] disponible en < http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGGB/5/nef_9_c.gif > [Modificada]

herramienta primaria usada para explorar y encontrar yacimientos de hidrocarburos³⁹

2.2.1.2 Prospección geoquímica. Analizar la distribución de elementos y compuestos relativos a ocurrencias del petróleo tiene distintas aplicaciones, algunas de ellas son útiles para el monitoreo de producción, la geoquímica es empleada para clasificar aceites crudos. Este método usa un análisis extremadamente preciso del crudo para determinar su fuente y posible ruta de migración, como resultado de su precisión es posible distinguir no solo los aceites acumulados individualmente en una región, sino que también los aceites de diferentes unidades de drenaje dentro de un campo. Si suficientes muestras fueran tomadas en la fase de exploración de un campo, la geoquímica permitiría verificar el flujo transversal y el agotamiento de las diferentes unidades de producción⁴⁰

2.2.1.3 Estudio de yacimientos. El único método disponible que permite estudiar las relaciones verticales y laterales de los diferentes tipos de roca en un reservorio con máxima exactitud. Este es el estudio de afloramientos, definido por áreas como canteras, acantilados, minas., el cual consiste en una secuencia conocida por ser un depósito en las cercanías o en el lateral equivalente del mismo, una detallada investigación de un afloramiento puede ser usado a menudo como una herramienta predictiva para modelar :

Presencia, madurez y distribución de la roca madre.

Porosidad y permeabilidad del reservorio.

Detallado del sistema de reservorio, incluyendo unidades de flujo, barreras y deflectores para el flujo del fluido.

³⁹ Ibid.

⁴⁰ Jahn, Frank; Cook, Mark & Graham, Mark. Op. cit., p. 24. [Traducción]

Frecuencia, orientación y historia geológica de fracturas y fallas sísmicas.

Continuidad lateral de arenas y lutitas.

Descripción cuantitativa de todo lo anterior para simulaciones del reservorio

En la última década algunas de las compañías petroleras más importantes han utilizado grandes cantidades de reservorios conocidos para diseñar y calibrar modelos computacionales. Estos modelos son empleados como herramientas para describir cuantitativamente la distribución y el comportamiento del flujo en diferentes unidades de reservorios, por lo tanto esta técnica no es solo importante para la fase de exploración sino aún más para la evaluación temprana de los perfiles de producción.⁴¹

2.2.1.4 Método de exploración Gravitacional El método gravitacional mide pequeñas ($\sim 10^{-6}$ g) variaciones en el campo magnético terrestre causado por los cambios de densidad en las estructuras geológicas, el elemento sensor es un sofisticado resorte balanceado, las variaciones en la gravedad de la tierra causan cambios en la longitud del resorte, la cual es medida . La medición debe ser corregida según la elevación de estación de registro. Las rocas sedimentarias generalmente tienen bajas propiedades magnéticas en comparación a otros tipos de rocas. Un gravímetro registra diferencias en la fuerza de gravedad en la superficie de la tierra, plasmando en un mapa estas diferencias se revelan grandes masas de roca densa bajo la superficie las cuales permiten a los geólogos tener una mejor idea de las estructuras bajo la tierra.⁴²

2.2.1.5 Método de exploración magnético. El método magnético detecta cambios en el campo magnético de la tierra causados por variaciones en las propiedades magnéticas de las rocas. En particular las rocas ígneas y sedimentarias poseen cualidades magnéticas significativamente altas y si están

⁴¹ Ibid., p.25.

⁴² Jahn, Frank; Cook, Mark & Graham, Mark. Op.cit., p. 16. [Traducción]

cerca a la superficie dan lugar a longitudes de onda, anomalías de gran amplitud en el campo magnético terrestre. Este método es aéreo realizado desde aviones o satélites lo que permite un estudio rápido y una cartografía con una buena cobertura, al igual que el método gravitacional este estudio es realizado al principio de un estudio de exploración, ambos métodos son principalmente empleados para definir estructuras de gran escala como cuencas. Basados en los mapas resultantes, se llevan a cabo estudios sísmicos⁴³

2.2.1.6 Método de Teledetección. Otra técnica empleada para la exploración en búsqueda de hidrocarburos es la Teledetección la cual se basa en el uso de fotografías aéreas para localizar y plasmar características de la superficie. Se está incrementando el uso de imágenes satelitales porque permite mostrar grandes áreas en la superficie de la tierra, aunque las fotografías sean tomadas a cientos de kilómetros en el espacio, son capaces de mostrar características con tan solo unos pies de variación. Y las imágenes satelitales no solo indican lo visible al ojo humano, sino que también revelan variaciones en la humedad del suelo, distribución de minerales y vegetación, y tipo de suelo, las cuales todas son importadas al rompecabezas de la exploración. Una vez que una área es seleccionada y la imagen satelital obtenida, los geólogos utilizan técnicas mapeo para producir un mapa geológico, (mapa que indica las estructuras geológicas mediante símbolos convencionales) para el área, una serie de líneas y flechas indican el tipo de estructura que existe en esa superficie algunas hechas de una combinación de estructuras llamadas anticlinales, sinclinales y fallas las cuales forman varios tipos de trampas de hidrocarburos⁴⁴

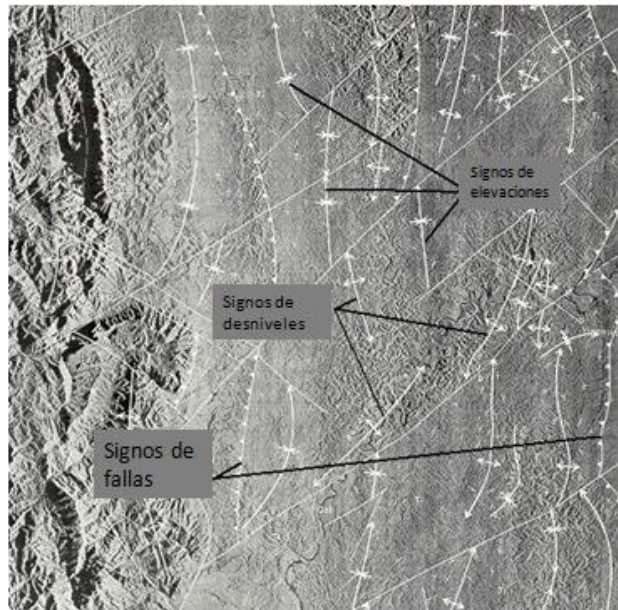
La teledetección también utiliza imágenes creadas por un radar ubicado en el suelo llamado “side looking airborne radar” (SLAR) algunas de estas imágenes son tomadas desde un avión mientras que otras son tomadas desde satélites o

⁴³ Ibid.,

⁴⁴ Hanson, Bradford & Bradley Robert, Op.cit ., [Traduccion]

cohetes espaciales, producen una imagen más como una fotografía que también muestra la estructura en la superficie terrestre. Figura 9.

Figura 9 Imagen satelital.



Fuente: ⁴⁵

Este tipo de mapas permiten a los geólogos a determinar en donde los hidrocarburos deberían estar localizados.

2.2.1.7 Reconocimiento por perforación. Un pozo de exploración es aquel que es perforado en un área nueva donde no existen otros Pozos y generalmente sin información previa de la zona, es perforado en un esfuerzo de localizar un yacimiento de hidrocarburos no descubierto. Uno de cada diez pozos de exploración se encuentran con petróleo o con gas, pero aproximadamente uno de cada 50 pozos localizados representan un beneficio económico significativo. Muchos de estos pozos son perforados por intuición, o por una pequeña cantidad

⁴⁵ Figura 9. Imagen satelital. [en línea] . 1999. [consultado 20 jun.2012] disponible en < <http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGBB/5/aero.gif> > [Modificada]

de geología representativa otros basados en experiencia fotográfica o en un área en particular. Los pozos de exploración generalmente son perforados con diámetros menores de lo normal porque esto representa un ahorro económico.

Recientes avances tecnológicos han conducido a mejorar las capacidades con los ordenadores Usando computadores que tienen un efecto mayor en la industria petrolera, nuevas técnicas sísmicas, han creado herramientas de exploración económicas, rápidas, y fáciles de operar enfocadas en la búsqueda de hidrocarburos.⁴⁶

2.2.2 Técnicas de explotación de hidrocarburos

Una vez encontrada una fuente adecuada de hidrocarburos se procede a la explotación de esta mediante técnicas de perforación. Se procede a instalar plataformas manuales para realizar la perforación y posteriormente llegar hasta el objetivo deseado durante este proceso el instrumento de perforación es orientado con diferentes ángulos de desviación para encontrar una ruta adecuada hasta el reservorio. Según su orientación se pueden clasificar en técnicas como las mencionadas a continuación.⁴⁷

2.2.2.1 Perforación vertical. Si se considera una trayectoria desde la superficie del pozo hasta su máxima profundidad es sensato buscar en la sección superficial, en el intermedio y en el intervalo de depósitos separadamente. La sección superficial, usualmente referida como el orificio superior el cual consiste en algunos sedimentos no consolidados, por lo tanto la fuerza de la formación es baja y los equipos y parámetros de perforación deben ser seleccionados acorde a esto. La sección del reservorio es más consolidada y es el objetivo principal por el cual

⁴⁶ Hanson,Bradford & Bradley Robert, Op.cit ., [Traduccion]

⁴⁷ Jahn, Frank;Cook,Mark & Graham,Mark. Op.cit., p. 44. [Traduccion]

el pozo está siendo perforado, por lo cual el proceso de perforación debe asegurarse que ningún intervalo productivo sea dañado

Para la primera sección del pozo es necesaria una base requerida para dar comienzo a la perforación. En tierra esta será situada en un sótano o bodega cementada en la cual un conducto o tubería será apilado antes de que la plataforma se mueva. El sótano acomodará “el árbol de navidad” (un arreglo de sellos y válvulas), una vez que el pozo ha sido completado y el equipo ha sido retirado de la localización. Como en la industria de la construcción, el pilotaje del conducto es hecho dejando caer peso sobre el o mediante el uso de martillos hidráulicos hasta no se produce una mayor penetración.

El orificio superior es usualmente perforado con un diámetro entre 23 y 27 pulgadas. La broca (rodillo de tipo cónico) está diseñada para perforar predominantemente formaciones suaves. Como resultado del diámetro del agujero y la tasa rápida de penetración, grandes cantidades de residuos deberán ser tratados y removidos del sistema de circulación. A menudo la tasa de penetración será reducida para permitir una adecuada remoción de estos mismos. En algunos casos este problema es aliviado mediante una primera perforación con un diámetro más pequeño y más tarde re perforando la sección hasta el tamaño requerido utilizando un abre huecos, este con un diámetro esencialmente más largo que el del orificio ya perforado.

En medio del orificio superior y la sección del reservorio en la mayoría de los casos una sección intermedia deberá ser perforada. Esta sección consiste en un grupo de rocas más consolidadas que en la parte superior. El ángulo de desviación es incrementado a menudo en este intervalo para alcanzar el objetivo

bajo la superficie y eventualmente una formaleta es instalada antes de entrar en la sección del reservorio. ⁴⁸

2.2.2.2 Perforación Horizontal. Debido a la localización de algunos reservorios se implementa otro tipo de técnica la cual es conocida como perforación horizontal que es dada debido a la distribución lateral de los reservorios de roca y fluidos, un pozo horizontal puede proveer una trayectoria óptima. La tasa de aumento del ángulo es su principal distinción desde un punto de vista de perforación. Pozos de radio medio son preferidos desde que pueden ser perforados, drenados y completados con un equipo convencional estándar. El éxito de los Pozos horizontales era en gran parte dependiente en el desarrollo de herramientas que revelan en tiempo real la adecuada posición de la broca en el subsuelo para ser perforado. Mejoras en esta tecnología ha aumentado considerablemente la eficacia con la que las trayectorias a los Pozos pueden ser rastreadas. La medición durante perforación es lograda por la inserción de una sonda en la fibra de perforación cerca de la broca. La transmisión de los datos es vía un pulso por presión de lodos el que es trasladado a través de un decodificador a una señal eléctrica, inicialmente proveía solo datos dirección, las herramientas han sido mejoradas hasta en el punto en el que la recolección de datos petrofísicos (rayos gamma, resistividad, densidad y porosidad) pueden ser obtenidos duran la perforación. ⁴⁹

2.2.2.3 Perforación de largo alcance. Existen Pozos más difíciles de alcanzar para ello se implementa la técnica de perforación de largo alcance. Un Pozo de mayor alcance esta ligeramente definido por tener un desplazamiento horizontal de al menos el doble de la profundidad vertical. Con la presente tecnología una proporción de más 4 (desplazamiento horizontal/profundidad vertical) pueden ser alcanzados. Los Pozos de mayor alcance son técnicamente mas difíciles de

⁴⁸ Op.Cit.,p. 44.

⁴⁹ Jahn, Frank; Cook, Mark & Graham, Mark. Op.cit., p.49. [Traducción]

perforar por el grado de ingeniería requerido para cada Pozo, el término “diseñador de Pozos es usado con frecuencia. La perforación de largo alcance será considerada cuando:

Existan restricciones en la superficie

Acumulaciones marginales se encuentre localizadas a varios kilómetros de las plataformas existentes.

En donde la perforación de largo alcance reduzca la cantidad de plataformas necesarias⁵⁰

2.2.2.4 Perforación de orificio reducido. La perforación de orificio reducido ha sido utilizada por la industria minera por muchos años. Recientemente la industria petrolera a estado desarrollando plataformas, componentes para cadena de perforación y herramientas de registro las cuales permitirán la implementación de orificios de diámetro pequeño y terminaciones, una definición utilizada para agujeros delgados es un pozo en el que un 90% o más de su longitud tiene un diámetro de 7 pulgadas o menos, en un principio, la perforación de agujeros delgados tenía el potencial de perforar Pozos con grandes reducciones de costos(en un rango de 40% a 60%) la reducción de costos se acumula de diferentes fuentes:

Menor preparación del sitio.

Fácil movilización de los equipos.

Reducción en la cantidad de consumibles (brocas ,cemento ,combustible).

Menor manejo de escombros.

Equipo más pequeño.

Las brocas utilizadas en esta técnica pesan aproximadamente 1/50 de las brocas convencionales y su reducido tamaño puede abrir fronteras haciendo las exploraciones en ambientes sensibles o áreas inaccesibles más económicas⁵¹.

⁵⁰ Ibid.,p. 50.

2.2.2.5 Perforación con tubo enroscado. Una versión especial de la técnica mencionada anteriormente está emergiendo en la actualidad como una alternativa viable llamada perforación con tubo enroscado. Mientras que las operaciones estándar de perforación son llevadas a cabo usando articulaciones de tubos de perforación, la perforación con tubo enroscado emplea una perfecta tubular hecha de acero de alta gama. Algunas ventajas de esta emplear esta técnica son:

Casi nula manipulación de tubería

Menor impacto ambiental

Menor coste de preparación , tiempo , movilización y desmovilización

Menor daño de las formaciones rocosas, mejor control del pozo el cual permite a balanceadas o desbalanceadas perforaciones una mayor tasa de penetración⁵².

2.3 ANTECEDENTES DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN COLOMBIA

Los hidrocarburos una vez localizados y explotados son llevados a las diferentes industrias petroleras para ser sometidos a distintos procesos de refinamiento y se convierten en materia prima para suplir las distintas necesidades del mercado. Para su uso y distribución de manera rápida y económica se implementa un sistema de redes de tubería llamados oleoductos generalmente instalados 1m bajo tierra en zonas desarrolladas y a cierta distancia del suelo en distintas zonas rurales. Existe la posibilidad de que se presenten accidentes en el sistema generando el derrame del hidrocarburo contenido.

Colombia ha sido víctima a lo largo de la historia de múltiples derrames de petróleo ocasionados en su mayoría por grupos al margen de la ley, hasta el

51 Jahn, Frank; Cook, Mark & Graham, Mark. Op.cit., p. 52. [Traducción]

52 Ibid., p. 53.

momento nadie se había preocupado por el profundo impacto que esto pudiese ocasionar para la comunidad en general hasta que la defensoría del pueblo tubo la iniciativa de realizar estudios y presentar un informe con lo encontrado.

Las cifras son alarmantes, de cada 100 barriles derramados tan solo el 30% se recuperan eficazmente, ocasionando esto un alto grado de contaminación en terrenos, ciénagas y ríos. Casos como el de la quebrada La Gritona, en el municipio de Curabá, Boyacá, puso en riesgo a la población del pueblo ya que este afluente surte del vital líquido al acueducto⁵³.

Las actividades petroleras tales como exploración, explotación, transporte, entre otras , se realizan principalmente en zonas frágiles y de abundante biodiversidad de tal forma que cuando se presenta un derramamiento de petróleo el sitio debe someterse a una serie de procesos para su correcta descontaminación tales como remover la vegetación y el suelo que entro en contacto con el petróleo, como consecuencia de esto muchos animales mueren , los campesinos pierden su lugar de trabajo ocasionando desplazamiento para poder sobrevivir. La defensoría hace énfasis en que las zonas reacondicionadas deben someterse a un continuo estudio aun después de haber remediado la situación de derramamiento, se conoce de casos en que la lluvia ocasiona que el petróleo supuestamente controlado vuelve a la superficie.

Según la Defensoría no hay un correcto planeamiento para recuperar zonas afectadas, es mas en muchos casos se hace apenas lo mínimo necesario para tratar de mejorar la situación derivando así un alto impacto en el medio ambiente, todo esto pese a que el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) a desarrollado una

53Contaminación por derrames de petróleo... En: Por primera vez en Colombia una entidad como la Defensoría del Pueblo puso el dedo en la yaga en una de las más perjudiciales formas de contaminación de que ha sido víctima el país: la generada por derrames de petróleo. [en línea] Disponible en < <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-555907>>

avanzada tecnología en procesos de descontaminación actualmente en desuso salvo por algunas excepciones (Ciénaga de Zapatos).

Se han conocido casos preocupantes como el incidente de caño limón coveñas en el cual se produjo una voladura del oleoducto generando el derrame de aproximadamente 1.000.000 de barriles de crudo las medidas tomadas para remediar estos incidentes son mínimos como se mencionaba no se lleva a cabo ninguna acción para buscar la recuperación de la zona pese a estudios de remediación que se llevan a cabo para combatir las situaciones mencionadas, es necesario indagar afondo para tener idea de la afectación del ambiente y encontrar soluciones rápidas y efectivas puesto que en Colombia existen una gran cantidad de fuentes de explotación de hidrocarburos⁵⁴ Figura 10.

Figura 10. Mapa de las principales cuencas de hidrocarburos del país



Fuente: ⁵⁵

54 Op. Cit.

55 Figura 10. Moreno Rengifo. Victor Manuel ., . Derrames de hidrocarburos. [en línea] . (2006). [consultado en 1 jul. 2012] Disponible en <<http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/pdf/derramesdehidro.pdf>>

En norte de Santander (Colombia) en la vía que conduce de Cúcuta a Bucaramanga se encuentra un oleoducto de 770 km que transporta el crudo hasta caño limón. Se produce la ruptura de una de las válvulas del oleoducto debido a esto se presenta un derrame que contamina un río conocido como “La pamplonita”, se afirma que se derramaron aproximadamente 20.000 barriles de crudo la mancha de crudo abarcó cerca de 90 km arrasando con diversas especies de peces, pese a que se llevaron a cabo acciones de limpieza para remover la mayor cantidad de crudo en el ambiente. Solo con observar la zona se ve a simple vista el deterioro ambiental los restos de crudo presentes en la arena, piedras y en el suelo los efectos de un derrame tardarán años en superarse.⁵⁶

En campo dos, jurisdicción de Tibú en el que km 367 del oleoducto de caño limón se presenta un acto terrorista contra éste, provocando la ruptura del tubo y generando un derrame que cae en una cañada que desemboca al río Tibucito, afluente del río Tibú, aproximadamente se derramaron 4.000 barriles en este punto no muy lejos al día siguiente se presenta un caso similar en el oleoducto río Zulia-Ayacucho, en el corregimiento Versalles, en zona rural de Tibú.⁵⁷

Al igual que los casos mencionados se presentan muchos otros anualmente en Colombia aunque se intenta remediar los daños causados al ambiente las secuelas de este tardan años en desaparecer por completo. Desconociendo el efecto que éste produce en el ambiente a lo largo de ese tiempo, se llevan a cabo estudios y planes de contingencia para actuar a tiempo frente a una problemática de éstas y tratar de reducir al máximo el daño causado por los hidrocarburos.

56 Rozo, Eduardo. La Crisis del Río Pamplonita. [en línea] .[Consultado 10/05/2012]. Disponible en <http://www.riourbano.org/index.php?option=com_content&view=article&id=22:crisisdelriopamplonita&catid=3:actualidad&Itemid=12>

57 Cuadrillas de trabajadores intentan contener derrames en el Catatumbo. En: Empleados, tanto de Ecopetrol como de Petróleos del Norte, lo intentan, en dos puntos diferentes. [en línea] ; (2011). [consultado 6/07/2012]. Disponible en < http://www.eltiempo.com/colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-9260922.html>

3. METODOLOGIA

El suelo base para la realización de este estudio consta de una arcilla inorgánica la cual fue preparada mediante la mezcla de SC (suelo areno arcilloso) con Caolín, en porcentajes de 45 y 55 (Figura 11) respectivamente para garantizar una naturaleza arcillosa del suelo. Fueron seleccionados 9 ensayos con el fin de obtener las características mecánicas presentes en el suelo y compararlas luego de contaminar el suelo con un hidrocarburo, estos regidos por la Norma INVIAS del 2007.

Figura 11. Suelo ajustado con 45% de SC y 55% de caolín



3.1 ORIGEN DE LA MUESTRA

El suelo areno arcilloso SC fue extraído de la obra del viaducto la novena ubicada en la ciudad de Bucaramanga y el caolín se obtuvo mediante la compra del mismo en la zona de Lagos , Florida blanca.

Se realizaron mezclas entre el caolín y el SC posteriormente se sometieron a ensayos de clasificación hasta dar con una proporción exacta de la mezcla para garantizar el tipo de suelo deseado, con base a los resultados obtenidos se decidió utilizar una mezcla compuesta por 45% de suelo SC y 55% de Caolín.

3.2 CONTAMINACIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL SUELO

El hidrocarburo utilizado para la contaminación de suelo fue provisto por la empresa colombiana Ecopetrol y su respectiva entrega se llevó a cabo en el Instituto colombiano del Petróleo ubicado en el km 7 vía piedecuesta, Santander.

Una vez ajustado el suelo, se procedió a tamizar su totalidad por la malla #4 removiendo gravas y partículas de mayor tamaño. Seguido a esto se realizó la caracterización mecánica del mismo mediante la aplicación de los ensayos de Gravedad específica de suelos, Granulometría, Límite líquido, Límite plástico, Límite contracción, Permeabilidad, Proctor modificado, Corte directo, Consolidación partiendo como base de estos resultados para identificar el cambio en suelo ocasionado por la contaminación.

Se repartieron 270 kg de suelo en 5 contenedores de plástico, 30kg destinados para los ensayos del suelo sin contaminar y 60kg para cada porcentaje de contaminación en los contenedores restantes porcentaje de 5%,10%,15% y 30%.

Para el proceso de contaminación se realizó la compra de una batidora con el fin de mezclar uniformemente la muestra de suelo con el hidrocarburo. Para ello, se mezclaba éste por secciones, se agregaban 10 kg de suelo y un porcentaje de crudo así hasta completar la cantidad designada en cada deposito (Figuras 12,13 y 14), terminada la contaminación se guardaron los contenedores en cuarto hasta que cumplieran el periodo de tiempo para realizar nuevamente ensayos en el, a los 15 y 55 días.

Figura 12. Inicio Mezcla del suelo mediante batidora



Figura 13. Suelo totalmente mezclado con la batidora



Figura 14. Proceso de mezclado del suelo con el hidrocarburo



3.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

Este ensayo se llevó a cabo únicamente con el suelo arcilloso no contaminado con el fin de realizar su debida clasificación .

Se tomó una muestra representativa del suelo 500 gr la cual se secó en el horno con una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Después del secado, se lavó la muestra utilizando el tamiz N°200 ($75\ \mu\text{m}$). Posteriormente, se llevó nuevamente al horno. Este procedimiento se realizó para disolver los terrones de suelo por medio del lavado y determinar la cantidad de suelo que pasa a través del tamiz N°200.

Se seleccionaron una serie de tamices según el tipo de suelo y ordenando éstos de mayor a menor, una vez que se realizó el tamizado al suelo, se registró la cantidad retenida en cada tamiz para finalmente realizar los cálculos y clasificación respectiva del suelo.

3.4 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS

En este ensayo es necesario la utilización de un picnómetro por lo que para evitar porcentajes de error por la variación de éste. Se realizó la calibración agregando cantidades parciales de agua y desairándolas con una bomba de vacío hasta alcanzar el menisco del picnómetro. Este proceso se realizó a temperatura ambiente, caliente y fría y se trabajó con el picnómetro calibrado durante los ensayos realizados en cada tipo de suelo.

Para dar comienzo al ensayo, se tomó una muestra representativa del suelo con su humedad natural, se pasó la muestra por el tamiz # 10 hasta obtener una cantidad aproximada de 100 -120 gr de suelo.

Por medio de un embudo situado en la parte superior del picnómetro, se depositaba el suelo en el picnómetro (Figura 15) y posteriormente se le agregó agua. Se realizó esta labor en tres capas cada una debidamente desairada. Cabe resaltar que en las muestras de suelo contaminado fue necesario agitar y rotar el picnómetro con el fin de mezclar el agua con el suelo, ya que éste al estar impregnado de hidrocarburo adquirió propiedades impermeables (Figuras16 y 17).

Figura 15. Deposito del suelo dentro del picnómetro



Figura 16. Picnómetro con suelo contaminado impermeable



Figura 17. Rotación de picnómetro con suelo impermeable



Luego de realizadas las tres capas cada una desairada adecuadamente se pesó el recipiente y se registró su temperatura, a continuación se vertió la muestra en un recipiente metálico, el cual fue llevado al horno por 24 horas y terminado el secado (Figura 18) y se pesó la muestra. Una vez obtenidos los datos necesarios se realizaron los cálculos correspondientes para obtener los resultados de cada muestra.

Figura 18. Suelo después de 24 horas de secado.



3.5 RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)

Para el ensayo de Proctor modificado se utilizó una muestra de suelo de 7kg de cada suelo respectivamente. Antes de iniciar el ensayo era necesario secar la muestra en el horno por 24 horas procedimiento que solo fue realizado con el suelo no contaminado.

El suelo mezclado con hidrocarburo al 5 y 10 por ciento de concentración por porcentaje en peso al llevarse al horno y dejarlo por un largo periodo de tiempo debido a las propiedades del crudo se incineraba y no era posible trabajar con él. El suelo contaminado al 15 y 30 por ciento se consideró peligroso e imprudente dejarlo en el horno por un largo periodo de tiempo sin observación debido al alto contenido de crudo en el. Por lo tanto se optó por realizar el secado del suelo depositándolo en un platón y llevándolo a una hornilla (Figura 19).

Figura 19. Secado del suelo mediante hornilla eléctrica



Mientras el suelo se encontraba secándose se mantuvo dentro del platón en constante movimiento para garantizar un secado homogéneo y evitar que se quemara el material en la parte inferior. La humedad del suelo se reduce en la hornilla al máximo posible sin que este se queme.

Una vez seca la muestra, se extiende en platón, se cuartea y se procede a compactarla en un cilindro previamente pesado y medido. Se vierten cinco capas de suelo dentro del cilindro. A cada una de estas capas se le aplican 55 golpes con un martillo de acero (Figura 20 y21). Terminado ésto, se pesa el cilindro y se remueve la muestra para añadirle una cantidad de agua aproximadamente el 4% del peso inicial de la muestra. Se repite este procedimiento hasta que después de alcanzar un aumento en el peso de la muestra este se reduzca luego de repetir dicho procedimiento (Figura 22).

El ensayo en los suelos contaminados al 10,15 y 30 debió repetirse debido a que un 4% de humedad para iniciar era demasiado alto lo que arrojaba datos erróneos en el momento de los cálculos respectivos. Por lo tanto se optó por iniciar agregando una cantidad de agua del 1%, teniendo la precaución de tomar la

humedad del suelo en el cilindro compactado cada vez que se le adicionaba agua. Luego de terminados los procedimientos mencionados se registran todos los datos para los cálculos respectivos.

Figura 20. Compactación de suelo mediante martillo de hierro.



Figura 21. Suelo compactado con martillo de hierro.



Figura 22. Compactación terminada por disminución de volumen.



3.6 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE MÉTODO DE CORTE DIRECTO

Una vez obtenida la humedad óptima del ensayo de Proctor modificado se toma una muestra de suelo entre 7 a 8 kilogramos. Conociendo su humedad, se extiende sobre un platón y se le adiciona la cantidad de agua faltante para que alcance la humedad óptima.

Después de tener la muestra lista, se compactó el suelo en un cilindro a cinco capas de 55 golpes cada una. El siguiente paso a seguir, es introducir por medio de un gato hidráulico, unos moldes cuadrados para la extracción de la muestra en el cilindro. Se realiza el procedimiento hasta obtener tres muestras cuadradas. Cuando se tienen las muestras en el molde, se toman medidas de diámetro y altura y se pesan tanto el molde con el suelo húmedo y el molde sin suelo. Luego se procede a la extracción de éstas dentro de la caja de corte adecuada según la maquina a utilizar.

Figura 23. Muestra de suelo dentro de caja de corte directo.



Una vez que se tiene la muestra como se observa en la Figura 23 se introduce la caja en la máquina de corte y se ensayan las tres muestras con un peso que corresponda a esfuerzo σ de 0,5, 1 y 2 Kg/cm² y se procede a realizar el ensayo, tomando nota de las lecturas arrojadas por los diales de la maquina (Figura24) Una vez falla la muestra se retira de la caja y se toma una muestra del suelo para determinar la humedad exacta que tenía en el momento del ensayo (Figura 25)

Figura 24. Diales maquina de corte.

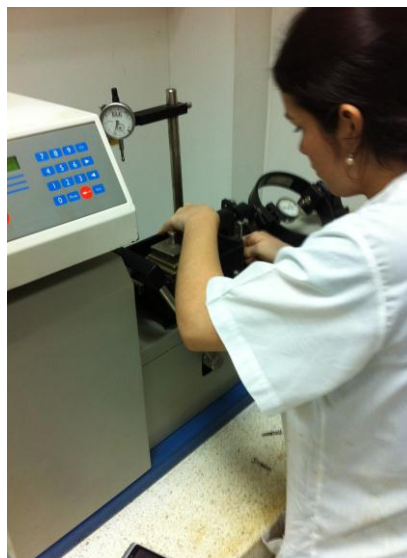


Figura 25. Muestra fallada y retirada de la caja de corte directo.



3.7 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS (CABEZA VARIABLE)

Para este ensayo se tomaron de 7 a 8kg de suelo, se realizó el secado de éste en la hornilla. Posteriormente, se compactó con su humedad óptima en un cilindro a cinco capas cada una con 55 golpes. Posteriormente, se procede a introducir en él cilindro un molde circular con la ayuda de un gato hidráulico. (Figura 26)

Figura 26. Introducción de molde mediante gato hidráulico.



Una vez que se introduce el molde y se retira del cilindro teniendo cuidado de no dañar la pastilla, se remueve ésta del molde con la ayuda de un corcho plástico (Figura 27)

Figura 27. Pastilla de permeabilidad extraída mediante corcho de plástico.



Con la pastilla lista, se procede a tomar el diámetro y la altura de ésta para luego introducirla en el aparato de permeabilidad, engrasando cuidadosamente el cilindro plástico propio del aparato. Se introduce la muestra en él y se remueve la grasa acumulada en la parte de arriba generada por el desplazamiento. Una vez la pastilla está en el cilindro, se coloca un papel filtro por ambos lado de la muestra y se aprisiona con dos piedras porosas, una a cada lado respectivamente. Finalmente, se sitúa el cilindro en la base del aparato llenándolo hasta el tope con agua. Después, es debidamente tapado y se conecta una manguera delgada en un orificio ubicado en la tapa del aparato la cual se encuentra ajustada a una regleta para realizar la medición del descenso en el agua. (Figura 28). En casos en los que se producía una salida excesiva de agua, se optó por dejar la muestra en saturación con el fin de que la muestra arcillosa se expandiera reduciendo pérdidas de agua por los costados que no estaban debidamente sellados.

Normalmente se deberían tomar registros en las alturas del agua H_1 y H_2 en intervalos de media hora, pero con este tipo especial de suelo contaminado en

media hora no se registraba ningún cambio. Por tal motivo, se decidió tomar las lecturas cada 24 horas para registrar una variación del nivel del agua. Una vez obtenidos los datos necesarios, cambio de nivel H_1 y H_2 , temperatura de cada lectura y altura y diámetro de la pastilla se realizaron los cálculos debidos.

Figura 28. Montaje terminado de Equipo de permeabilidad



3.8 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Para la realización de este ensayo se toma una muestra de 6 a 7 kg de suelo seco o parcialmente seco conociendo previamente la humedad en éste y se adiciona agua hasta alcanzar su humedad óptima para compactarlo en un cilindro a cinco capas cada una de 55 golpes.

Una vez compactado el suelo en el cilindro, se introduce un molde circular con la ayuda de un gato hidráulico y posteriormente se extrae el molde del cilindro y se introduce con el molde en el aparato de consolidación.

Obtenida la pastilla se registran datos de altura, diámetro, peso de la pastilla con el molde, peso del molde y se toma una muestra para conocer la humedad inicial del ensayo.

Para dar comienzo al ensayo se ajusta la cámara de consolidación en la máquina y se coloca en 0 la lectura del dial (Figura 29). Debido a la sensibilidad del aparato se ubicó este en una zona aislada lejos del contacto con terceros.

Las lecturas del ensayo se toman durante 8 horas y dichas lecturas son ocasionadas por las cargas y descargas de peso distribuidos en carga de 0,5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 4 kg/cm², y descarga de 4 a 2 kg/cm², de 2 a 1 kg/cm², de 1 a 0,5 kg/cm² y descarga de 0,5 a 0 kg/cm². Finalizada la toma de estas lecturas, se desmonta la muestra y se coloca en el horno para registrar el peso de la muestra seca con el molde. Con esto finaliza el ensayo y la toma de datos necesarios para realizar los cálculos respectivos.

Figura 29. Ajuste del dial en el equipo de consolidación.



3.9 LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO

Para este ensayo se tomó una muestra de 100 gr de suelo con su humedad natural previamente tamizado por la malla #40. Posteriormente, se vertió la muestra en un recipiente de cerámica en la que se mezcló con agua y se amasó de forma alternada y repetida hasta formar una pasta uniforme de consistencia dura (Figura 30). El suelo contaminado tarda un poco en mezclarse con el agua debido a sus propiedades impermeables adquiridas (Figura 31) por lo que se debe mezclar reiteradamente.

Figura 30. Formación de pasta con suelo contaminado



Figura 31. Mezcla de suelo impermeable.



Se procede a depositar la pasta dentro de la copa de casa grande en la que se comprime y se extiende la muestra para nivelarla y buscar que tenga una profundidad de 10 mm. Luego se divide la muestra por medio de un ranurador curvo. Se enciende la máquina y se realiza un ajuste de mezcla hasta que ésta alcance 25 golpes antes de que la división hecha se cierre. Con la proporción de agua y suelo obtenida se re ajusta para obtener cuatro muestras de suelo dos que generen una cantidad de golpes mayor a 25 y dos menores tomando una muestra de cada mezcla y depositándola en una cápsula para lleva al horno por 24 horas.

Terminado el proceso de secado se toma nota de los datos obtenidos y se hacen los cálculos correspondientes.

3.10 LÍMITE PLÁSTICO DEL SUELO

Para este ensayo de tomaron 100gr de suelo pasados por el tamiz #40 con su humedad natural. Se procedió a mezclar el suelo con agua en un recipiente de plástico hasta formar una pasta con una consistencia adecuada para la prueba.

Sobre un vidrio esmerilado se amasó el suelo hasta formar rollos de un diámetro aproximado al de una barra de soldadura (Figura 32)

Figura 32. Elaboración de muestras para límite plástico.



Normalmente se amasa el suelo hasta que esté presente fisuras y pérdida de humedad. Al trabajar con el suelo contaminado, éste expulsaba el hidrocarburo (Figura 33) haciendo más difícil el proceso de fisura de los royos de suelo por lo que se recomienda limpiar continuamente la superficie sobre la que se trabaje.

Figura 33. Expulsión de hidrocarburo durante la mezcla.



Una vez que se obtienen fisuras en los royos de suelo, se depositan en cápsulas previamente pesadas y se llevan al horno para secarse durante 24 horas.

Terminado el tiempo de secado se pesan las muestras y se procede a realizar los cálculos apropiados para el ensayo.

3.11 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS

Para el ensayo de contracción se tamizó una muestra de suelo por la malla #40 hasta obtener aproximadamente 200 gr. La muestra de suelo se depositó en una cápsula de evaporación de porcelana y se mezcló completamente con agua suficiente para hacerla lo suficientemente pastosa y manejable.

Antes de comenzar el ensayo, se tomaron dos recipientes de contracción metálicos revistiéndolos con una delgada capa de grasa para evitar la adhesión del suelo en éstos. Se agregan aproximadamente tres capas en cada recipiente golpeando cada una para extraer el aire en la muestra. En la última capa se enrazó el suelo hasta quedar al nivel del molde.

Se llevaron las muestras al horno por 24 horas. Una vez cumplido el tiempo se retiraron del horno obteniendo dos pastillas redondas de suelo y se pesaron. (Figura 34.)

Durante el ensayo es necesaria la manipulación de mercurio y como medida de seguridad se debe hacer en un espacio abierto con una adecuada ventilación y utilizar guantes en todo momento.

Figura 34. Pastillas de contracción secas.



A continuación se llenó un recipiente de vidrio con mercurio y se registró el peso de éste. Posteriormente, se depositó una pastilla de suelo dentro de éste y se sumergió de tal manera que se desplazara una cantidad de mercurio fuera de él. Se realizaba el procedimiento para las dos muestras y se registró el peso del mercurio desplazado, datos necesarios para los cálculos correspondientes al ensayo.

4. RESULTADOS OBTENIDOS A LO LARGO DEL TRABAJO: CARACTERIZACION MECANICA DE SUELOS ARCILLOSO

Clasificación cualitativa de las muestras de suelo

Suelo sin contaminar

Suelo contaminado con un 5% de crudo a los 15 días

Suelo contaminado con un 10% de crudo a los 15 días

Suelo contaminado con un 15% de crudo a los 15 días

Suelo contaminado con un 30% de crudo a los 15 días

Suelo contaminado con un 5% de crudo a los 55 días

Suelo contaminado con un 10% de crudo a los 55 días

Suelo contaminado con un 15% de crudo a los 55 días

Suelo contaminado con un 30% de crudo a los 55 días

La granulometría, permitió clasificar el tipo de suelo, el cual es un suelo fino específicamente una arcilla inorgánica. Los demás ensayos se hacen con el fin, de obtener el comportamiento del suelo de estudio ante las diferentes porcentajes de contaminación por hidrocarburos en el suelo de estudio.

El análisis de los cambios del suelo a diferentes porcentajes, también se hicieron en relación al tiempo, los cuales fueron definidos a los 15 y 55 días respectivos, después de la contaminación. Los tiempos de estudio fueron ajustados teniendo en cuenta, que ante la presencia del derrame, en ocasiones las respuestas de intervención en nuestro medio son tardías. Además, el número de ensayos realizados fue limitado a la disponibilidad de equipos en el laboratorio. De lo anterior se desprende los resultados obtenidos durante el trabajo:

NOTA: Las muestras de suelo utilizadas para realizar los correspondientes ensayos de caracterización mecánica a los 15 y 55 días, después de su respectiva contaminación; se tomaron del mismo recipiente plástico, simplemente se esperó que el suelo cumpliera con los tiempos determinados.

4.1 RESULTADOS SUELO NO CONTAMINADO.

En el suelo sin contaminar se realizaron los ensayos que evidencian la tabla 3

Tabla 3 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso sin contaminar

Ensayo	Resultado	Valor obtenido	Norma
Granulometría	Grava %	1,27	I.N.V. E – 123 – 07
	Arena %	12,29	
	Finos %	86,42	
Límite líquido		35	I.N.V. E – 125 – 07
Límite plástico		18,78	I.N.V. E – 126 – 07
Límite de contracción	Límite de contracción WS	14,85	I.N.V. E – 127 – 07
	Relación de contracción SF	1,92	
Gravedad específica	Peso específico	3,153	I.N.V. E – 128 – 07
Proctor modificado	Humedad óptima %	13,20	I.N.V. E – 142 – 07
Corte directo	Ángulo de fricción interna	6,65	I.N.V. E – 154 – 07
	Cohesión (Kg/Cm ²)	0,1945	
Permeabilidad	nT/n20	0,8893	I.N.V. E – 130 – 07

Ensayo	Resultado	Valor obtenido	Norma
	KT	5,21E-08	
	K20	4,64E-08	
Consolidación	Coeficiente de consolidación	0,163	I.N.V. E – 151 – 07
		0,469	
		0,190	
		0,279	

El suelo sin contaminar fue ajustado con 55 % de caolín y el 45% de suelo tipo SC sin contaminar. Se realizó un análisis granulométrico con el fin de confirmar que el tipo de suelo era fino. Sin embargo en las demás muestras de suelo contaminado no se realizó este ensayo, debido a que no era aplicable al objetivo de caracterizar el suelo, ya que se seguía usando el mismo ya clasificado. Además el crudo imposibilitaba las condiciones ideales del ensayo.

En los ensayos de permeabilidad, corte directo y consolidación las muestras se compactaron con la humedad óptima+3% de agua, con el fin de volver mas manejable el suelo, ya que las muestras hechas con la humedad óptima eran difíciles de trabajar, y por lo tanto sufrían danos que imposibilitaban su uso.

4.2 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 5%

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos de los ensayos aplicados al suelo contaminado al 5% de concentración de crudo a los 15 y 55 días después de ser respectivamente contaminados.

Tabla 4 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 5% de crudo

Ensayo	Resultado	Suelo 5% 15días	Suelo 5% 55días	Norma
Límite líquido		46,5	48,5	I.N.V. E – 125 – 07
Límite plástico		24,11	21,73	I.N.V. E – 126 – 07
Límite de de contracción	Límite de contracción WS	15,41	12,55	I.N.V. E – 127 – 07
	Relación de contracción SF	1,8	1,85	
Gravedad específica	Peso específico	2,612	2,317	I.N.V. E – 128 – 07
Proctor modificado	Humedad óptima %	12,80	11	I.N.V. E – 142 – 07
Corte directo	Ángulo de fricción interna	32,53	49,46	I.N.V. E – 154 – 07
	Cohesión (Kg/Cm ²)	0,0712	1,1602	
Permeabilidad	nT/n20	0,9097	0,9206	I.N.V. E – 130 – 07
	KT	7,41E-09	1,36E-08	
	K20	6,74E-09	1,25E-08	
Consolidación	Coeficiente de consolidación	-----	0,071	I.N.V. E – 151 – 07
			0,158	
			0,030	
			0,020	

La anterior tabla muestra los ensayos que se realizaron a la muestra de suelo contaminada en porcentaje por peso del 5% de crudo a los 15 y 55 días respectivos desde su contaminación. Las muestras de los ensayos de

permeabilidad, corte directo y consolidación fueron realizadas en un molde de proctor modificado y fueron compactadas con la humedad óptima del suelo en las condiciones respectivas del mismo.

4.3 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 10%

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos de los ensayos aplicados al suelo contaminado al 10% de concentración de crudo a los 15 y 55 días después de su respectiva contaminación.

Tabla 5 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 10% de crudo

Ensayo	Resultado	Suelo 10% 15días	Suelo 10% 55días	Norma
Límite líquido		29	34,5	I.N.V. E – 125 – 07
Límite plástico		20,75	19,78	I.N.V. E – 126 – 07
Límite de contracción	Límite de contracción WS	10,76	10,82	I.N.V. E – 127 – 07
	Relación de contracción SF	1,78	1,79	
Gravedad específica	Peso específico	2,200	2,578	I.N.V. E – 128 – 07
Proctor modificado	Humedad óptima %	6,8	6,5	I.N.V. E – 142 – 07
Corte directo	Ángulo de fricción interna	31,71	55,98	I.N.V. E – 154 – 07
	Cohesión (Kg/Cm ²)	0	0,0069	

Ensayo	Resultado	Suelo 10% 15días	Suelo 10% 55días	Norma
Permeabilidad	nT/n20	0,8602	0,9151	I.N.V. E – 130 – 07
	KT	2,25E-08	8,06E-09	
	K20	1,94E-08	7,38E-09	
Consolidación	Coeficiente de consolidación	_____	0,073	I.N.V. E – 151 – 07
			0,079	
			0,071	
			0,046	

La muestra de suelo de este proyecto fue contaminada en un porcentaje por peso del 10% de crudo y se le realizaron los anteriores ensayos a los 15 días y 55 días, después de que se hiciera la mezcla de suelo y crudo. El material de estudio permaneció en reposo dentro de un recipiente plástico, mientras transcurría el tiempo anteriormente dicho.

4.4 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 15%

La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos de los ensayos aplicados al suelo contaminado al 15% de concentración de crudo a los 15 y 55 días después de su respectiva contaminación.

Tabla 6 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 15% de crudo

Ensayo	Resultado	Suelo 15% 15 días	Suelo 15% 55 días	Norma
Límite líquido		54,5	45	I.N.V. E – 125 – 07
Límite plástico		22,47	22,9	I.N.V. E – 126 – 07
Límite de de contracción	Límite de de contracción WS	15,83	11,09	I.N.V. E – 127 – 07
	Relación de de contracción SF	1,65	1,76	
Gravedad específica	Peso específico	2,318	2,052	I.N.V. E – 128 – 07
Proctor modificado	Humedad óptima %	7,10	4,40	I.N.V. E – 142 – 07
Corte directo	Ángulo de de fricción interna	18,38	60,53	I.N.V. E – 154 – 07
	Cohesión (Kg/Cm ²)	0,0266	0	
Permeabilidad	nT/n20	0,8829	0,9056	I.N.V. E – 130 – 07
	KT	1,94E-08	5,89E-09	
	K20	1,71E-08	5,34E-09	
Consolidación	Coeficiente de de consolidación (cm2/min)		0,262	I.N.V. E – 151 – 07
			0,086	
			0,067	
			0,032	

4.5 RESULTADO DEL SUELO CONTAMINADO AL 30%

La tabla 7 muestra los resultados obtenidos de los ensayos aplicados al suelo contaminado al 30% de concentración de crudo a los 15 y 55 días después de su respectiva contaminación.

Tabla 7 Caracterización mecánica de un suelo arcilloso contaminado con el 30% de crudo

Ensayo	Resultado	Suelo 30% 15días	Suelo 30% 55días	Norma
Límite líquido		55	50	I.N.V. E – 125 – 07
Límite plástico		21,11	24,59	I.N.V. E – 126 – 07
Límite de contracción	Límite de contracción WS	18,87	16,94	I.N.V. E – 127 – 07
	Relación de contracción SF	1,63	1,62	
Gravedad específica	Peso especifico	2,362	2,269	I.N.V. E – 128 – 07
Proctor modificado	Humedad óptima %	3,70	5,50	I.N.V. E – 142 – 07
Corte directo	Ángulo de fricción interna	22,24	39,91	I.N.V. E – 154 – 07
	Cohesión (Kg/Cm ²)	0,9667	0,3258	
Permeabilidad	nT/n20	0,9056	0,9206	I.N.V. E – 130 – 07
	KT	1,28E-08	5,42E-09	

Ensayo	Resultado	Suelo 30% 15días	Suelo 30% 55días	Norma
	K20	1,16E-08	5,02E-09	
Consolidación	Coeficiente de consolidación	0,204	0,065	I.N.V. E – 151 – 07
		0,081	0,074	
		0,054	0,029	
		0,033	0,020	

Específicamente la características del suelo contaminado en un porcentaje por peso del 30% de crudo, contenían una humedad muy alta y una humedad óptima muy baja para hacer la respectiva compactación. Sin embargo, el suelo fue secado rigurosamente en la hornilla, con el fin de llevar a cabo los ensayos señalados en la tabla 9.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

En general, las propiedades mecánicas de los suelos se afectan por la presencia de cualquier contaminante o inclusive con la presencia del agua. A lo largo del estudio, fueron evidentes las variaciones en los límites de Atterberg, en la gravedad específica, en la capacidad cortante del suelo, en la permeabilidad y en la consolidación del medio. Los resultados, aunque preliminares muestran una tendencia de variación dependiendo de la concentración del contaminante. A continuación se analizan los distintos resultados.

Para la comprensión de los resultados obtenidos, es necesario considerar la notación que ha sido utilizada a lo largo de este estudio, en el que principalmente se trabajó con un suelo arcilloso inorgánico (Sn).

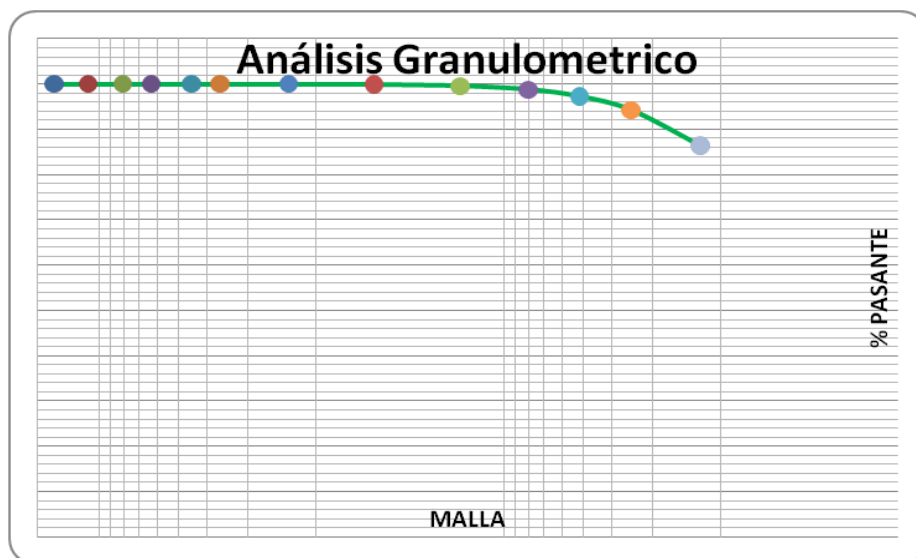
Suelo sin contaminar:	Sn
Suelo contaminado con un 5% de crudo a los 15 días	Sa
Suelo contaminado con un 10% de crudo a los 15 días	Sb
Suelo contaminado con un 15% de crudo a los 15 días	Sc
Suelo contaminado con un 30% de crudo a los 15 días	Sd
Suelo contaminado con un 5% de crudo a los 55 días	Se
Suelo contaminado con un 10% de crudo a los 55 días	Sf
Suelo contaminado con un 15% de crudo a los 55 días	Sg
Suelo contaminado con un 30% de crudo a los 55 días	Sh

5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

Con los resultados mostrados en la figura 35 y la tabla 8, se realizó el análisis granulométrico en el suelo no contaminado (Sn). El resultado obtenido fue un suelo fino, debido al contenido de estos superior a 86,43%.

Resultado Análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado

Figura 35. Resultado Análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado



La tabla 8 contiene los resultados del ensayo de granulometría

Tabla 8 Resultado de análisis granulométrico por tamices

Malla No	Peso suelo retenido gr	Porcentaje retenido parcial %	pasante %
10	0,44	0,09	99,91
20	1,64	0,35	99,55
40	3,85	0,83	98,72

Malla No	Peso suelo retenido gr	Porcentaje retenido parcial %	pasante %
60	6,67	1,44	97,29
100	14,19	3,05	94,24
200	35,04	7,81	86,43
Pasa 200	401,68	86,43	0
Total	463,51	100	

Por medio del análisis granulométrico se obtuvieron los siguientes porcentajes.

Grava: 1,28%, Arenas: 12,30% y Finos 86,43%.

Mediante la obtención del índice de plasticidad con los ensayos de límite líquido y límite plástico se obtuvo la clasificación CL, es decir, una arcilla inorgánica con lo que garantiza la naturaleza arcillosa del suelo sin contaminar.

Con lo anterior se asegura que el suelo base para el desarrollo del presente proyecto compuesto por 45% de SC (Arena arcillosa) y 55% de caolín es clasificado como una Arcilla inorgánica de baja compresibilidad

5.2 ANALISIS DE LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO ARCILLOSO

Es importante en el análisis de este ensayo realizar las respectivas comparaciones entre el suelo sin contaminar, los suelos contaminados y el tiempo transcurrido.

5.2.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

La tabla 9 muestra los resultados de límite líquido y los porcentajes de variación respecto al suelo no contaminado.

Tabla 9. Porcentaje de variación del límite líquido realizados a todas las muestras de suelo respecto al suelo sin contaminar.

tipo de suelo	Límite Líquido %	%Variación respecto al suelo no contaminado
Suelo no contaminado	35	-----
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	46,5	32,86
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	48,5	38,57
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	29	17,14
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	34,5	1,43
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	54,5	55,71
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	45	28,57
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	55	57,14
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	50	42,86

En la tabla anterior se evidencian las variaciones que sufrieron los suelos respecto a Sn. El suelo después de 15 días de su respectiva contaminación, muestra una variedad considerable de cambios en su límite líquido. En donde el porcentaje de variación va desde 1,43% y 57,14%.

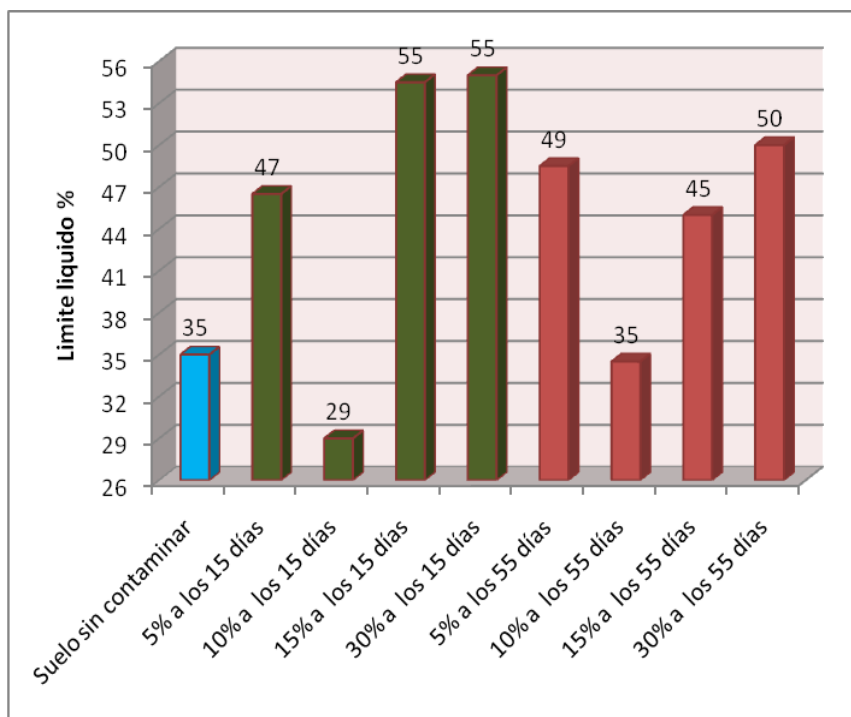
Los resultados de este ensayo de acuerdo a los suelos Sf, Sh y Si, demuestran también una alta variación; sin embargo, el suelo contaminado al 10% a los 55 días presenta tan solo un cambio de 1,43% respecto a Sn.

Es importante denotar que la mayoría de las arcilla tiene una capacidad de absorción alta, ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio⁵⁸. Sin embargo, se debe destacar que el hidrocarburo tiende a agrupar partículas de suelo y repelar partículas de agua, lo cual aparentemente puede ser la explicación para esta variación. Los resultados preliminares indican que la concentración del 10% de suelo es la que menos cambios tiene con respecto al suelo testigo Sn y que concentraciones superiores afectan significativamente este límite líquido.

En la Figura 36 se pueden apreciar los resultados de los ensayos de límite líquido realizados al suelo a los 15 y 55 días después de su correspondiente contaminación a diferentes porcentajes, de esta manera es identificable la variación que se está presentando.

⁵⁸ García Romero, Emilia y Suarez Barrios, Mercedes. LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS. En: Yacimientos minerales. [en línea]. [Consultado 15 jul. 2012]. Disponible en <<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm>>

Figura 36 resultados de límite líquido de suelos contaminados y Sn



5.2.2 Porcentajes de Variación de acuerdo con la variable tiempo: 15 y 55 días

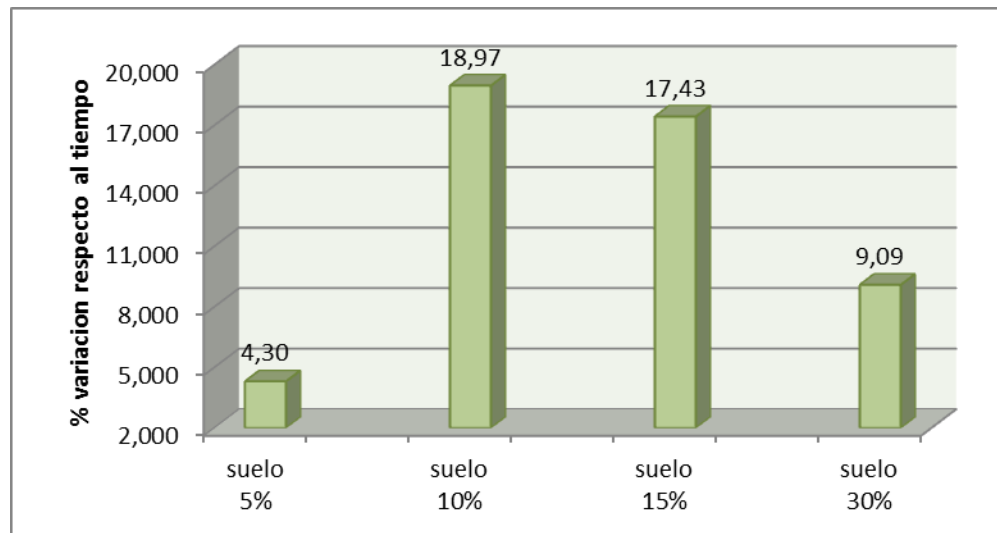
La tabla 10 revela los porcentajes de variación respecto al tiempo, de acuerdo al respectivo porcentaje de contaminación. Con base en lo anterior se puede concluir que no solo la cantidad de crudo afecta el resultado de esta prueba, sino el tiempo de exposición de crudo en el suelo también. Por lo tanto el factor tiempo juega un papel esencial en la caracterización del suelo. Es de destacar, que los resultados preliminares permiten evidenciar que en concentraciones mayores al 15% los suelos tienden a disminuir su límite líquido a medida que pasa el tiempo. Contrario a lo que pasó en concentraciones menores al 10% que se evidenció un aumento en el porcentaje de límite líquido.

Tabla 10 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo

tipo de suelo	Límite Líquido %	% de variación entre tiempos respecto a 15 días
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	46,5	4,30
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	48,5	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	29	18,97
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	34,5	
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	54,5	17,43
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	45	
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	55	9,09
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	50	

En la Figura 37, se pueden apreciar los porcentajes de variación de los resultados de Límite líquido respecto al tiempo: 15 y 55 días

Figura 37 porcentajes de variación de los resultados de Límite líquido respecto al tiempo: 15 y 55 días



El límite líquido (LI) permite conocer si el suelo es de compresibilidad baja o media (L), o por el contrario si son de alta compresibilidad (H).⁵⁹ Esto se obtiene de acuerdo al porcentaje, es decir. Si el LI es < 50% quiere decir es un L; por el contrario el LI es > 50% es un H.⁶⁰

Con base en lo anterior y de acuerdo con los valores de la tabla 10, se demuestra que todas las muestras sometidas al ensayo de límite líquido arrojaron como resultado un suelo de baja compresibilidad; a excepción de los suelos 15% y 30% a los 15 días y 30% a los 55 días posteriores a la contaminación

5.3 ANALISIS DE LÍMITE PLÁSTICO DEL SUELO ARCILLOSO

Es importante en el análisis de este ensayo realizar las respectivas comparaciones entre el suelo sin contaminar, los suelos contaminados y el tiempo transcurrido.

⁵⁹ Juárez y Rico. Op.cit., p.155

⁶⁰ Ibid., p.1 55

5.3.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

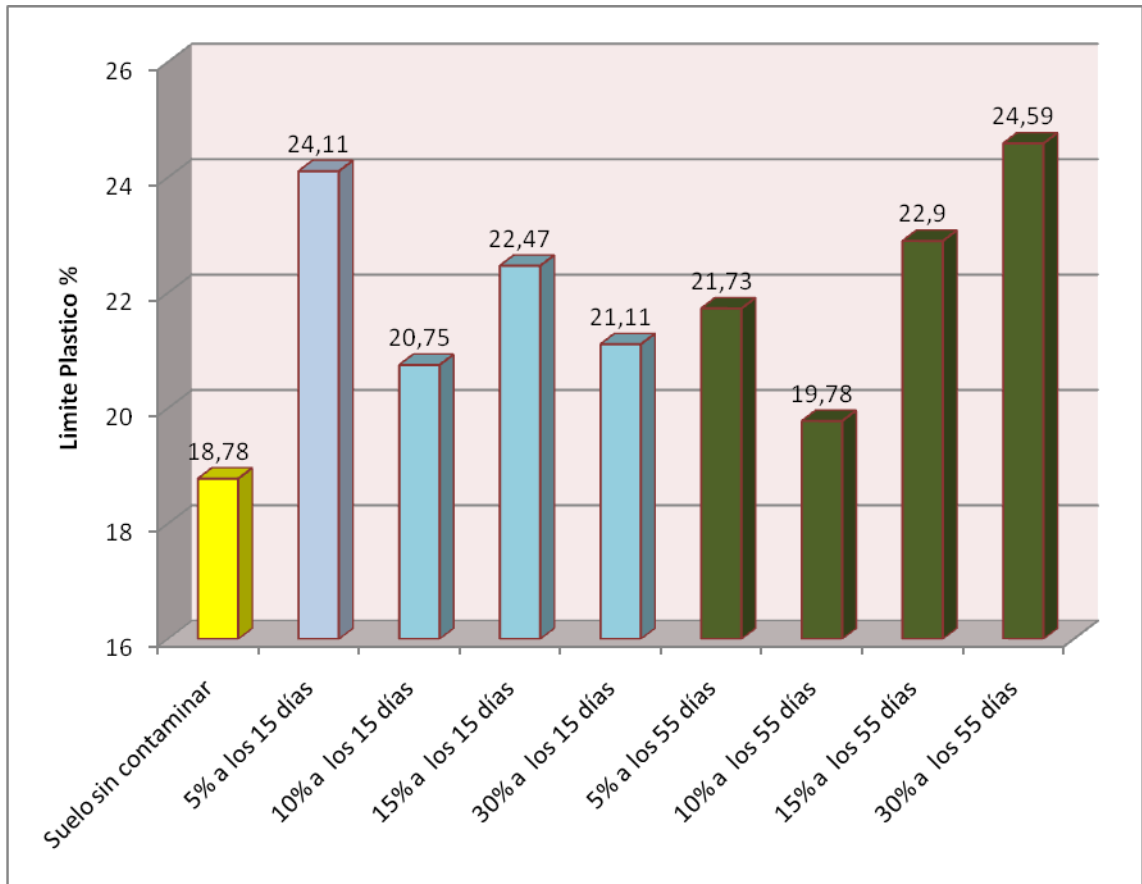
La tabla 11 muestra los resultados del límite plástico (Lp) hechos a los diferentes especímenes de suelo en los tiempos estipulados. Se puede observar que los valores de Lp se encuentran dentro de un rango aproximado de 18,7% y 24,59%, y que el valor del Lp en todos los suelos estuvo por encima del Lp del suelo no contaminado (Sn).

Tabla 11. Porcentaje de variación del límite plástico realizados a todas las muestras de suelo respecto al suelo sin contaminar.

tipo de suelo	Límite Plástico %	%Variación respecto al suelo no contaminado
Suelo no contaminado	18,78	-----
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	24,11	28,38
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	21,73	15,71
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	20,75	10,49
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	19,78	5,32
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	22,47	19,65
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	22,9	21,94
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	21,11	12,41
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	24,59	30,94

En la Figura 38, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite Plástico correspondientes al suelo sin contaminar y a los 15 y 55 días posteriores de la contaminación con crudo.

Figura 38 resultados de límite líquido de suelos contaminados y Sn



En la Figura 38 se evidencian los resultados obtenidos, a partir de los ensayos realizados al suelo contaminado en una concentración por porcentaje en peso determinada. La muestra no contaminada (Sn) presentó el menor límite plástico.

5.3.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días

En la tabla 12, se presentan los cambios que sufrió el Lp en muestras de suelo contaminadas con el mismo porcentaje de crudo pero analizadas en diferente

período de tiempo. Los resultados preliminares parecen indicar que concentraciones por debajo del 10% de crudo están ocasionando un descenso del valor del Lp, mientras concentraciones mayores sufren un incremento. Esto puede explicarse si se considera que el crudo causa un agrupamiento de las partículas de suelo, repele el agua afectando con ello el comportamiento plástico que pudiera tener.

Tabla 12 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo

tipo de suelo	Límite Plástico %	% de variación entre tiempos respecto a 15 días
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	24,11	9,87
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	21,73	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	20,75	4,67
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	19,78	
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	22,47	1,91
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	22,9	
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	21,11	16,49
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	24,59	

Aunque las variaciones respecto al tiempo son considerables el valor absoluto de cambio del resultado del límite plástico entre los suelos no es mucho aproximadamente:

$$S_a - S_e = 2,38\%$$

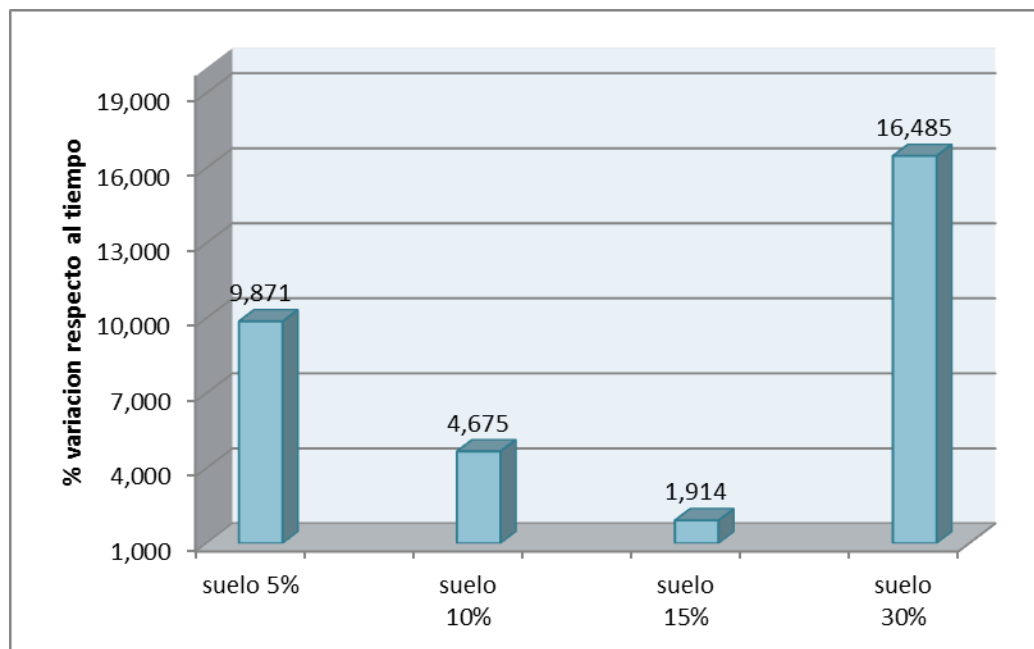
$$S_b - S_f = 0,97\%$$

$$S_c - S_g = 0,43\%$$

$$S_d - S_h = 3,48\%$$

En la Figura 39, se pueden apreciar los porcentajes de variación de los resultados de Límite Plástico respecto al tiempo (15 y 55 días).

Figura 39 Grafico del porcentaje de variación del límite Plástico entre tiempos respecto a 15 días



La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada por Atterberg Límite Plástico⁶¹, es decir que los contenidos de agua que dieron como resultado en la tabla 11, están en esta frontera

Según Juárez y Rico⁶² en algunas arcillas, el límite plástico varía normalmente en la misma dirección del líquido, pero sus variaciones suelen ser solo del orden de un tercio de las del límite líquido. Hecho que da a entender que las variaciones, en los ensayos de límites líquidos suelen ser mayores a las de límite plástico. Esta afirmación se confirma en los ensayos practicados en el proyecto excepto en el suelo contaminado a una concentración (gr/gr) del 5% (tabla 13):

Tabla 13 diferencia del contenido de agua entre suelos contaminados con el mismo porcentaje de crudo

tipos de suelo	Límite plástico	Límite líquido
Sa – Se	2,38%	2%
Sb – Sf	0,97%	5,50%
Sc – Sg	0,43%	9,50%
Sd – Sh	3,48%	5%

5.4 RESPECTO A LOS ENSAYOS DE LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO

Con la obtención de resultados en ambos ensayos, se calculó de acuerdo a la carta de plasticidad (Tabla 14) y el índice de Plasticidad (Tabla 15), la clasificación al que pertenece cada espécimen de suelo en estudio.

⁶¹ Juárez. y Rico, Op.cit., p. 128

⁶² Juárez. y Rico, Op.cit., p. 137

Tabla 14. Indicación de plasticidad de los suelos

I.P.	Descripcion
0	No plástico
1-5	Ligeramente plástico
5-10	Baja plasticidad
10-20	Mediana plasticidad
20-40	Alta plasticidad
>40	Muy alta plasticidad

Fuente⁶³

Tabla 15 índice de plasticidad de acuerdo a cada espécimen de suelo

Tipo de suelo	INDICE DE PLASTICIDAD %	Descripción
Suelo no contaminado	16,22	Mediana Plasticidad
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	22,39	Alta Plasticidad
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	26,77	Alta Plasticidad
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	8,25	Baja Plasticidad
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	14,72	Mediana Plasticidad
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	32,03	Alta Plasticidad
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	22,1	Alta Plasticidad
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	33,89	Alta Plasticidad
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	25,41	Alta Plasticidad

De acuerdo a la tabla anterior se puede observar la descripción de plasticidad de acuerdo al tipo de muestra.

⁶³ CRESPO VILLALAZ, Carlos Mecánica de Suelo y Cimentaciones. México D.F: Limusa, 2004, p. 98

En la Tabla 16 aparecen las iniciales para la respectiva clasificación del suelo

C = Arcilla inorgánica

L = Suelos de baja o media compresibilidad

H = Suelos de alta compresibilidad

Tabla 16 Clasificación del suelo

tipo de suelo	Clasificación del suelo
Suelo no contaminado	CL
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	CL
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	CL
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	CL
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	CL
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	CH
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	CL
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	CH
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	CH

En concordancia con la tabla 16 la mayoría de los suelos tiene una clasificación CL que significa Arcilla Inorgánica de baja compresibilidad; sin embargo, las muestras de suelo Sc, Sd y Sh muestran un Suelo Arcilloso de alta compresibilidad. Lo que se le puede atribuir al alto grado de crudo en los suelos, puesto que los especímenes que demuestran estos cambios son los que presentan mayor concentración de hidrocarburo en porcentaje y peso.

Si bien el suelo contaminado al 15% a los 55 días no presenta este hecho, es importante aclarar que el límite líquido era de 45%. Valor que se acerca a la frontera que separa la (L) de la (H).

5.5 LÍMITE DE CONTRACCION DEL SUELO ARCILLOSO

El análisis de variaciones en el límite de concentración se presenta de igual manera que en los anteriores casos, inicialmente comparando las variaciones con el suelo no contaminado (Sn) y posteriormente las variaciones entre suelos contaminados comparando cada porcentaje con respecto al tiempo, con el fin de verificar si existe relación.

5.5.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

La Tabla 17 contiene los resultados de límite de contracción y relación de contracción; y los porcentajes de variación de Lc y SF respecto al suelo sin contaminar.

Tabla 17 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo Sn para todas las muestras de suelo

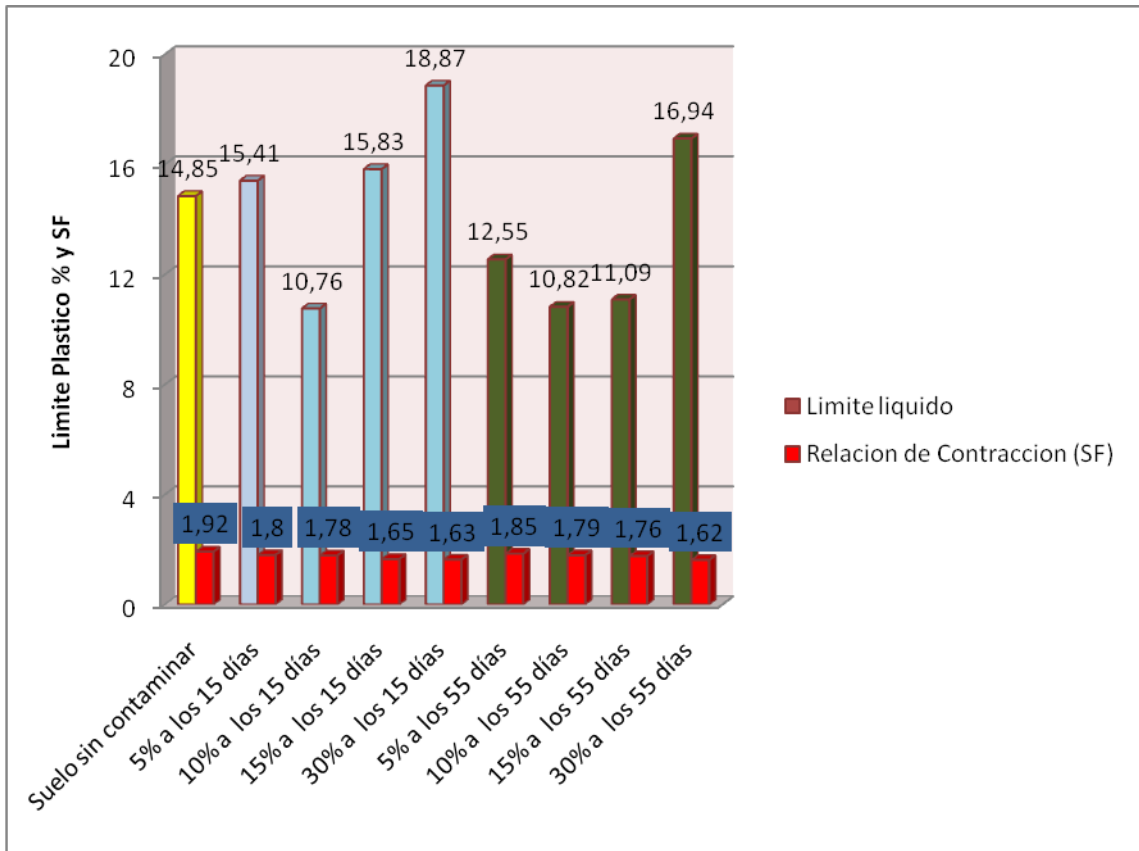
tipo de suelo	Límite Contracción %	%Variación respecto Sn de acuerdo al Lc	Relación de contracción SF	%Variación respecto Sn de acuerdo al Sf
Suelo no contaminado	14,85	-----	1,92	-----
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	15,41	3,77	1,8	6,25
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	12,55	15,49	1,85	3,65
Suelo contaminado	10,76	27,54	1,78	7,29

tipo de suelo	Límite Contracción %	%Variación respecto Sn de acuerdo al Lc	Relación de contracción SF	%Variación respecto Sn de acuerdo al Sf
al 10% a los 15 días				
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	10,82	27,14	1,79	6,77
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	15,83	6,60	1,65	14,06
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	11,09	25,32	1,76	8,33
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	18,87	27,07	1,63	15,10
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	16,94	14,07	1,62	15,63

La tabla 17 describe las variaciones de los Ll y Sf porcentuales de los diferentes suelos analizados en este proyecto con respecto al suelo sin contaminación. En lo referente a la relación de contracción los cambios siguen siendo muy variables, pero, no tan considerables en magnitud.

En la Figura 41, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite de Contracción correspondientes al suelo sin contaminar y a los 15 y 55 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 40 Resultados de límite de contracción y relación de contracción partiendo del tiempo de exposición tiempo



De acuerdo a la Figura 40 se puede observar que los límites de contracción de menor valor son: el suelo contaminado en una concentración por porcentaje en peso del 10% con cifras de a los 15 y 55 días respectivamente de su contaminación.

Por otro lado, se evidencia que los ensayos practicados al suelo del 30% de contaminación presentan los valores más altos en esta prueba. Adicionalmente, que el suelo sin contaminar presenta la relación de contracción más alta lo cual pudiera ser explicable considerando que los suelos sin contaminar presentan sus partículas dispuestas a acomodarse. En cuanto los contaminados sufren un comportamiento diferente por el encapsulamiento que hace el crudo. Por el

contrario los suelos contaminados con una concentración del 30% exhiben los valores más bajos. En los demás resultados no sigue un patrón específico.

5.5.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días

En la tabla 18 se presenta la variación del límite de contracción para suelos contaminados con el mismo porcentaje pero analizados en diferente período de tiempo.

Tabla 18 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo

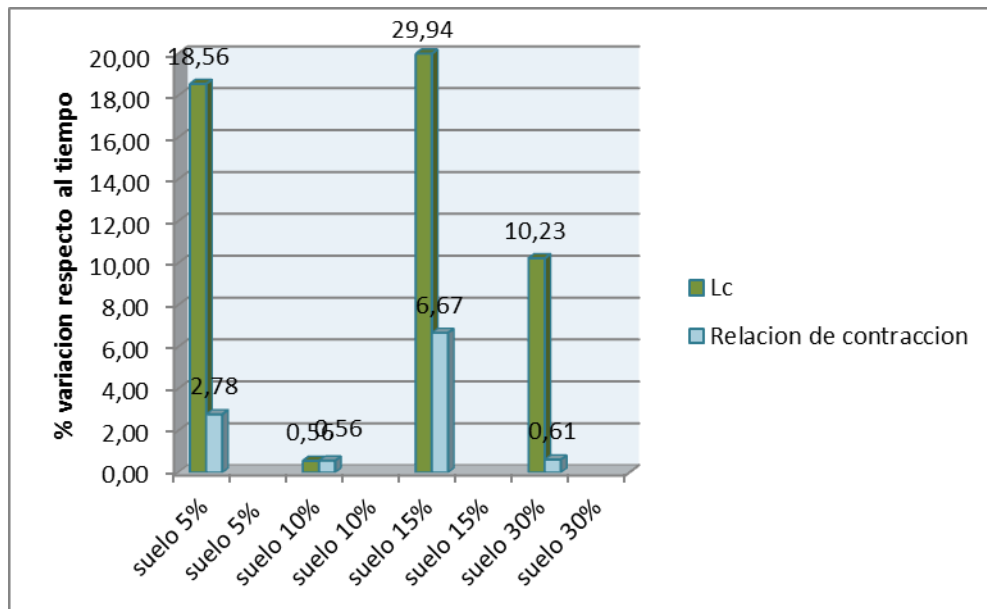
tipo de suelo	Límite de Contracción %	% de variación entre tiempos respecto a 15 días	SF	% de variación de SF entre tiempo respecto a 15 días
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	15,41	18,56	1,80	2,78
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	12,55		1,85	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	10,76	0,56	1,78	0,56
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	10,82		1,79	
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	15,83	29,94	1,65	6,67
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	11,09		1,76	
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	18,87	10,23	1,63	0,61
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	16,94		1,62	

Respecto al límite de contracción:

Los resultados preliminares están indicando que el límite de contracción del suelo desciende a medida que pasa el tiempo, queda por demostrar, si dejando la muestra de suelo más tiempo, puede el suelo llegar a tener un valor cercano al inicial.

En la Figura 41, se presenta la variación del límite de contracción y relación de contracción para suelos contaminados con el mismo porcentaje pero analizados en diferente período de tiempo.

Figura 41 porcentajes de variación de los resultados de Límite de Contracción y relación de contracción respecto al tiempo



La norma INVE-127 dice, los límites aceptables de dos resultados para varios operadores para una precisión adecuada es de 6,8. El cual es la diferencia máxima permitida entre ambas pruebas⁶⁴.

A continuación se presentan dos ensayos de límite de contracción realizados a la misma muestra de suelo:

Tabla 19 resultados de precisión del ensayo límite de contracción

Tipo de Suelo	Límite de contracción WS% Capsula 1	Límite de contracción WS% Capsula 2	Diferencia entre los resultados
S0	13,19	16,51	3,32
15	13,28	17,54	4,26
Sb	11,12	10,4	0,72
Sc	15	16,66	1,66
Sd	18,65	19,09	0,44
Se	13,57	11,53	2,04
Sf	11,15	10,5	0,65
Sg	11,02	11,16	0,14
Sh	18,85	15,04	3,81

Respecto a INVE-127 la máxima diferencia entre ambas pruebas descrita en la tabla es de 3,32%. Al ser menor de 6,8 se cumplen las condiciones que describe la norma en estos casos.

Este límite queda determinado por la mínima cantidad de agua necesaria para llenar solamente los poros de una muestra de suelo seco⁶⁵. Es decir que los

⁶⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas: Determinación de los factores de contracción de los suelos 2007. 8 p. Inve-127

resultados vistos anteriormente, hacen referencia a la cantidad de agua mínima necesaria para encontrar el menor volumen de la masa de suelo.

“La plasticidad no es un propiedad permanente de las arcillas, sino por el contrario es circunstancial y depende directamente de su contenido de agua”⁶⁶ y por lo tanto se presentan variaciones en los diferentes resultados de plasticidad.

5.6 ANALISIS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA EN SUELO ARCILLOSO

5.6.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

En la tabla 20, se observan los resultados de los ensayos de gravedad específica realizados durante el proyecto, además se muestran los porcentajes de variación; efecto de los pesos específicos.

Tabla 20 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica respecto Sn para todas las muestras de suelo

Notación	tipo de suelo	Peso específico (gr/cm3)	%Variación respecto al suelo no contaminado
Sn	Suelo no contaminado	3,153	-----
Sa	Suelo contaminado al 5% a los 15 días	2,612	17,16
Se	Suelo contaminado al 5%	2,317	26,51

65 LÍMITES DE ATTERBERG: Límite Líquido, Plástico, de Retracción. [en línea].(2011). [Consultado 15 jul. 2012]. Disponible en <
<http://uningenierocivil.blogspot.com/2011/03/consistencia-límites-de-atterberg.html>

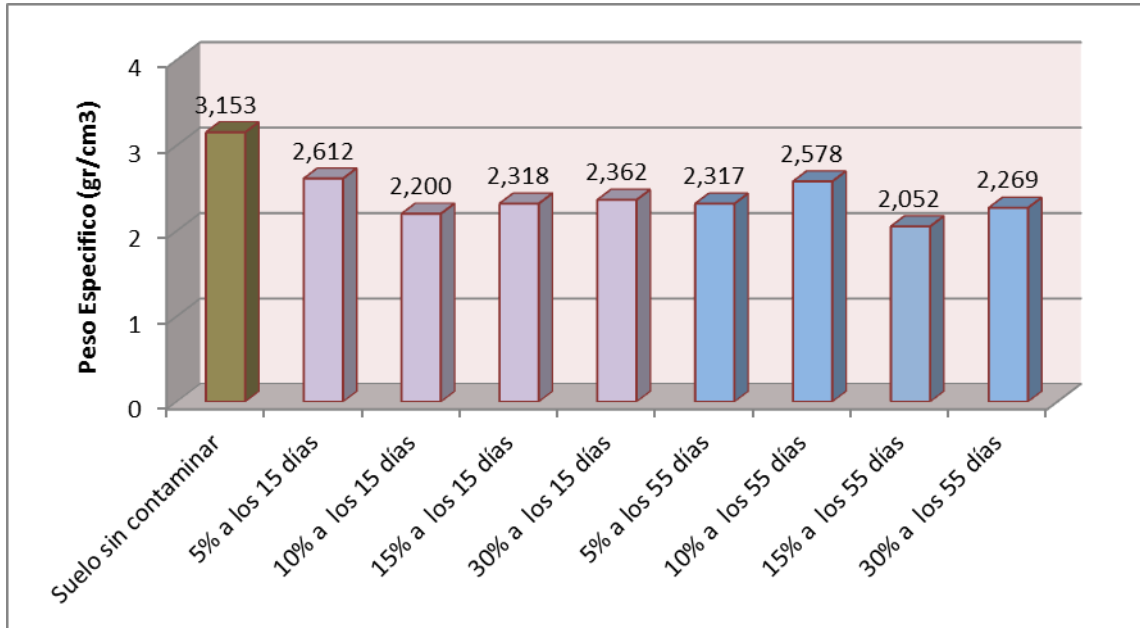
⁶⁶ Juárez. y Rico. Op.cit., p.127

Notación	tipo de suelo	Peso específico (gr/cm3)	%Variación respecto al suelo no contaminado
	a los 55 días		
Sb	Suelo contaminado al 10% a los 15 días	2,200	30,23
Sf	Suelo contaminado al 10% a los 55 días	2,578	18,24
Sc	Suelo contaminado al 15% a los 15 días	2,318	26,48
Sg	Suelo contaminado al 15% a los 55 días	2,052	34,92
Sd	Suelo contaminado al 30% a los 15 días	2,362	25,09
Sh	Suelo contaminado al 30% a los 55 días	2,269	28,04

Se observa que el valor de la gravedad específica en todos los casos descendió, con variaciones significativas en porcentajes por encima del 10% de contaminación del crudo en el suelo.

En la Figura 42, se pueden observar los resultados de los ensayos de gravedad específica correspondientes al suelo sin contaminar y a los de 15 y 55 días posteriores de la contaminación con crudo.

Figura 42 Resultados de Gravedad Específica de todas las muestras de suelo



De acuerdo con la Figura 42 se puede observar que el peso específico de los suelos contaminados no sufrió variaciones significativas entre las muestras de suelo sometidas a un porcentaje de contaminación.

Los resultados de gravedad específica no siguen un patron definido en donde se puedan establecer una correlación entre dos tipos de muestra que posean aspectos similares; sin embargo se puede apreciar que la presencia de crudo en el suelo afecta la gravedad específica; debido a que el valor de la G_s cambia considerablemente despues de que las muestras son contaminadas.

5.6.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días

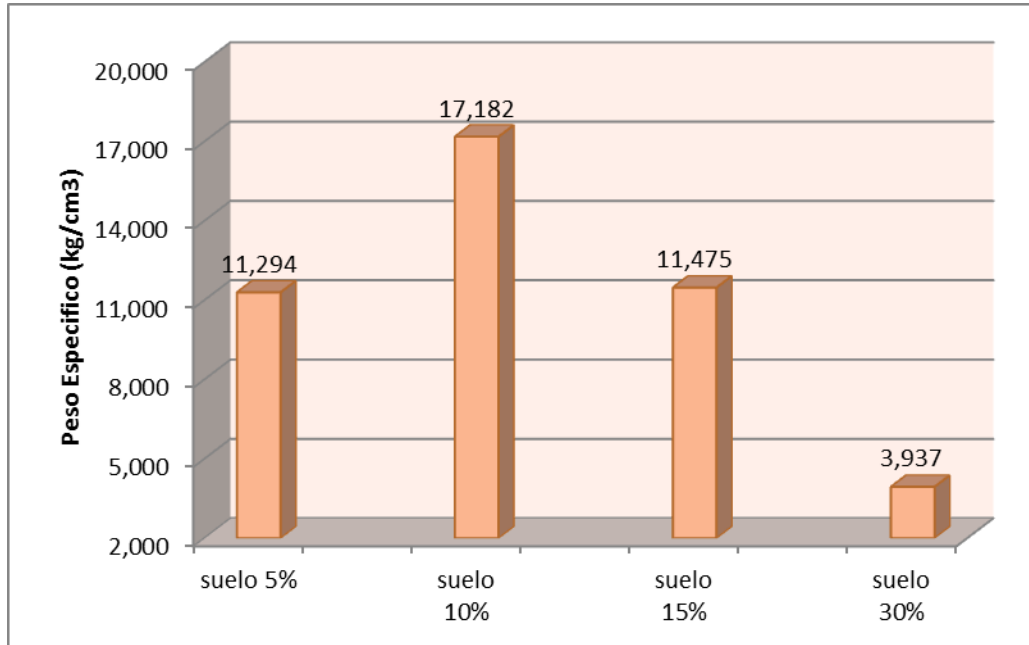
La Tabla 21 contiene los porcentajes de variación de gravedad específica respecto al tiempo

Tabla 21 porcentaje de variación entre tiempos

tipo de suelo	Peso específico	% de variación entre tiempos respecto a 15 días
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	2,612	11,29
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	2,317	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	2,200	17,18
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	2,578	
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	2,318	11,48
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	2,052	
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	2,362	3,94
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	2,269	

El suelo contaminado en un 10% de concentración por porcentaje en peso de crudo presenta la mayor variación con un aumento en gravedad específica del 17,18%. En los demás casos, la gravedad específica del suelo contaminado, con el paso del tiempo, aparentemente sufre un descenso (Figura 43).

Figura 43 porcentajes de variación del peso específico respecto al tiempo



La gravedad específica de un suelo se toma como el valor promedio para los granos del suelo. En la tabla 22 se aprecian los valores típicos de Gravedad específica para una arcilla inorgánica, los cuales están dentro del rango 2,72 -2,8. Por otro lado en la tabla 20 se presentan todos los resultados de peso específico relativo de todas las muestras de suelo; sin embargo ninguno de los resultados coinciden con el rango esperado y dicho anteriormente.

Tabla 22 Valores típicos de Gravedad Específica

Tipo de suelo		Gravedad Específica (gr/cm ³)
Inorgánico	Grava	2,65
	Arena gruesa a media	2,65
	Arena fina (Limosa)	2,65
	Loess, polvo de piedra y limo arenoso	2,67
Inorgánico	Arena algo arenosa	2,65

Tipo de suelo		Gravedad Específica (gr/cm ³)
	Limo arenoso	2,66
	Limo	2,67-2,7
	Arena arcillosa	2,67
	Limo arcillo arenoso	2,67
	Arcilla arenosa	2,7
	Arcilla limosa	2,75
	Arcilla	2,72-2,80
Orgánico	Limos con trazos de materia orgánica	2,3
	Lodos aluviales orgánicos	2,13-2,60
	Turba	1,50-2,15

Fuente⁶⁷

5.7 ANALISIS DE PROCTOR MODIFICADO EN EL SUELO ARCILLOSO

5.7.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

En la tabla 23, se observan los resultados de los ensayos de proctor modificado realizados durante el proyecto, además se muestran los porcentajes de variación respecto al Suelo no contaminado.

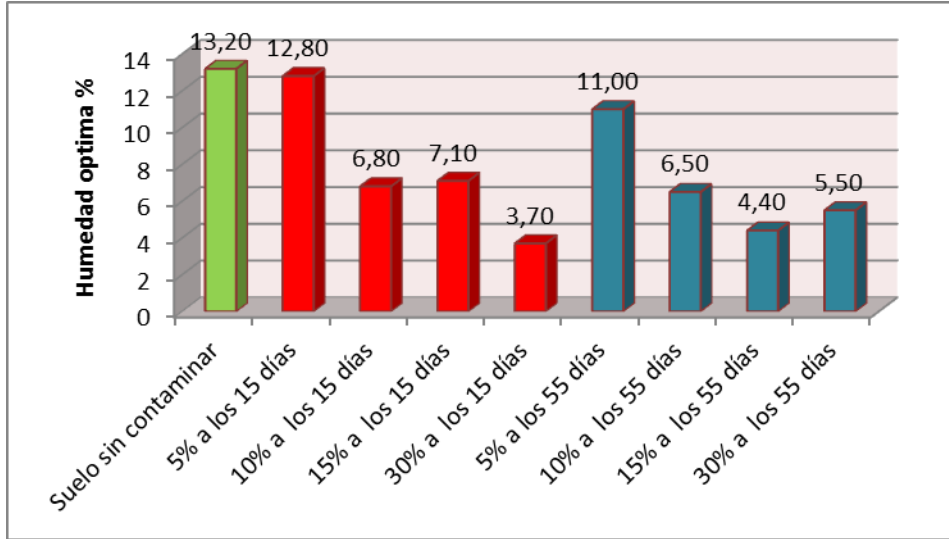
⁶⁷ Ricaldoni, Julio. Tablas y abacos. En: Curso de Geología de Ingeniería e Introducción a la Mecánica de Suelos. [en línea]. (2008);p.4 [Consultado 15 jul. 2012]. Disponible en <http://www.fing.edu.uy/iet.old/areas/geotecnica/cursos/mec_suelos/material_d/tablas_abacos_08.pdf>

Tabla 23 Porcentajes de Variación de los resultados de humedad óptima respecto Sn para todas las muestras de suelo

Tipo de suelo	Humedad Óptima %	%Variación respecto al suelo no contaminado
Suelo no contaminado	13,2	-----
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	12,8	3,03
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	11	16,67
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	6,8	48,48
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	6,5	50,76
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	7,1	46,21
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	4,4	66,67
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	3,7	71,97
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	5,5	58,33

en la Figura 44 se pueden observar los resultados de los ensayos de Proctor modificado correspondientes al suelo sin contaminar y a muestras de suelo mezcladas con crudo a los 15 y 55 días posteriores a su contaminación.

Figura 44 Resultados de Humedad óptima de todas las muestras de suelo



Se evidencian entonces, que en los suelos de 15 y 55 días posteriores a su contaminación hay una tendencia descendente en relación a la humedad óptima. Por otro lado, se puede apreciar que la humedad óptima del suelo sin contaminar es la más alta.

Además el suelo con mayor concentración de crudo (30%) presenta en ambos tiempos humedades óptimas bajas, con base a las demás. Los resultados permiten inferir que el crudo está afectando directamente la humedad óptima del suelo.

5.7.2 Variación de acuerdo con variable tiempo 15 y 55 días

La Tabla 24 contiene los porcentajes de variación de las humedades óptimas respecto al tiempo

Tabla 24 porcentaje de variación entre tiempos

Tipo de suelo	Humedad óptimas	% de variación entre tiempos respecto a 15 días
---------------	-----------------	---

Suelo contaminado al 5% a los 15 días	12,8	14,06
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	11	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	6,8	4,41
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	6,5	
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	7,1	38,03
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	4,4	
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	3,7	48,65
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	5,5	

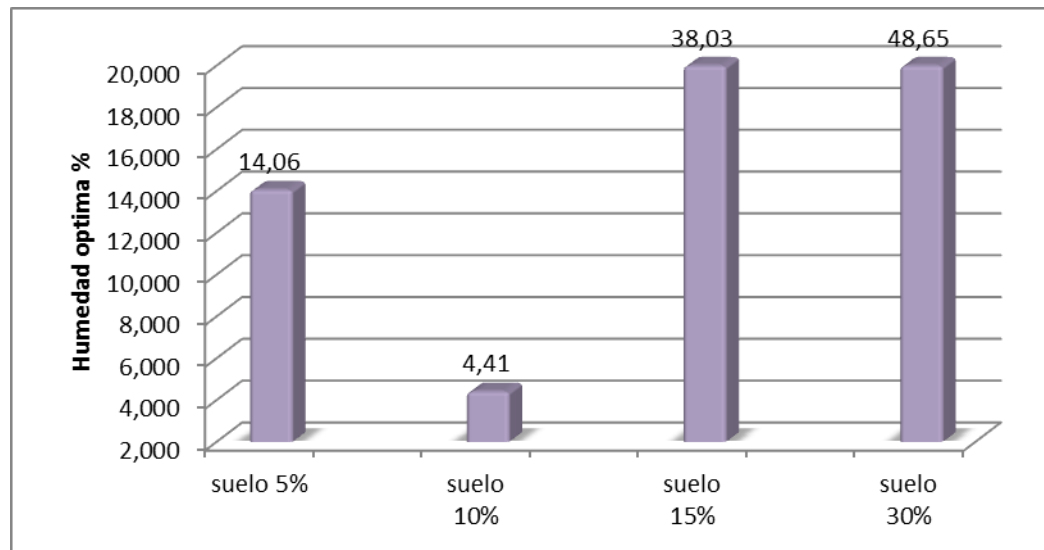
En la tabla 24 se describen los porcentajes de variación respecto al tiempo a los 15 después de su contaminación, de acuerdo a ello se observan fluctuaciones en estos porcentajes. Lo que quiere decir que la variación de las humedades óptimas en el tiempo; también se ven afectadas por la presencia de crudo en el material.

Se evidencia disminuciones en el valor de las humedades óptimas para suelos contaminados con el mismo porcentaje pero analizados en diferente período de tiempo a excepción del suelo contaminado al 30% a los 55 días.

El suelo que presenta un mayor cambio porcentual respecto al tiempo, es la muestra de suelo contaminada en una concentración por porcentaje en peso del

30%; por el contrario el suelo del 10% revela una menor variación entre los tiempos de exposición (Figura 45).

Figura 45 Porcentajes de variación de la humedad óptima respecto al tiempo



En un esquema más general como el que evidencia en la Figura 45, se observa claramente la disminución del porcentaje de humedad óptima de los suelos, lo que demuestra que el porcentaje de contaminación con crudo y el tiempo de reposo del suelo contaminado, influye directamente en su compactación, modificando la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance su humedad óptima.

5.8 ANALISIS DE CORTE DIRECTO EN EL SUELO ARCILLOSO

5.8.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

En la tabla 25, se observan los resultados de los ensayos de corte directo realizados durante el proyecto, además se muestran los porcentajes de variación respecto al Suelo no contaminado.

Tabla 25 Porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte respecto a Sn para todas las muestras de suelo

tipo de suelo	Ángulo de fricción interna	%Variación respecto a Sn	Cohesión (Kg/Cm ²)	%Variación respecto a Sn
Suelo no contaminado	6,65	-----	0,1945	-----
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	32,53	389,17	0,0712	63,39
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	49,46	643,76	1,1602	496,50
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	31,71	376,84	0	100,00
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	55,98	741,80	0,0069	96,45
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	18,38	176,39	0,0266	86,32
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	60,53	810,23	0	100,00
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	22,24	234,44	0,9667	397,02
Suelo contaminado al	39,91	500,15	0,3258	67,51

tipo de suelo	Ángulo de fricción interna	%Variación respecto a Sn	Cohesión (Kg/Cm²)	%Variación respecto a Sn
30% a los 55 días				

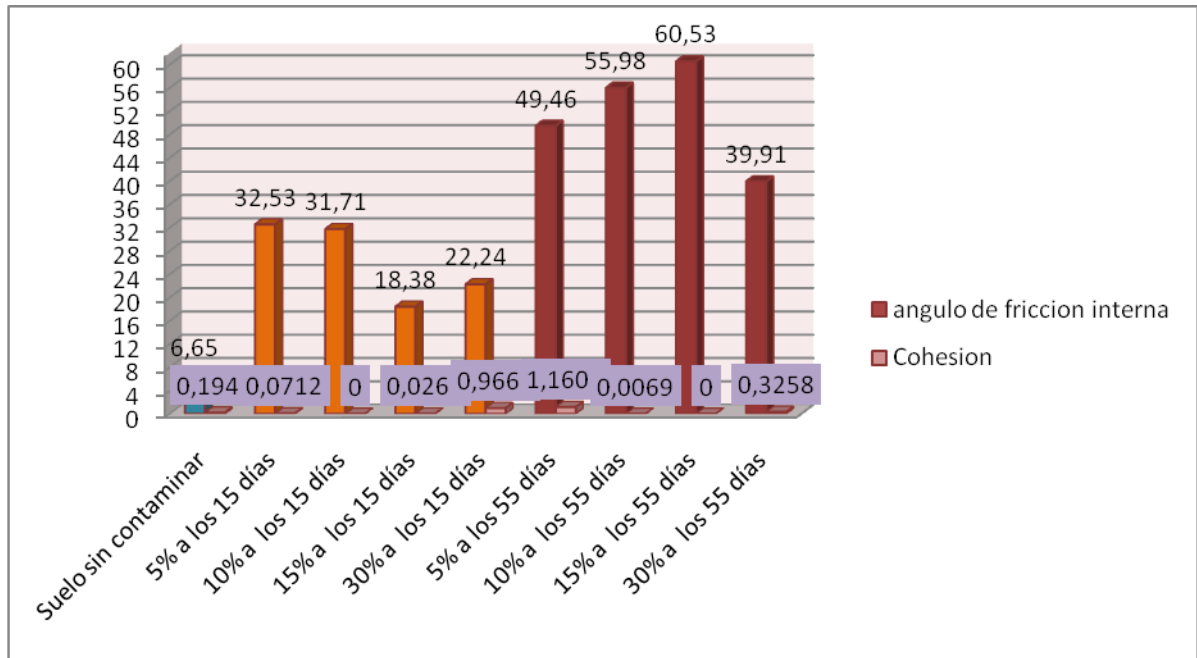
La tabla anterior presenta variaciones respecto a Sn demasiados altas esto se debe principalmente a dos factores:

El suelo no contaminado comenzó con un ángulo de fricción interno muy pequeño, por el contrario cuando se observan los resultados obtenidos en las muestras contaminadas este factor aumenta abruptamente; pasando de un ángulo de 6,65 a 18,38 cuyos valores son los mas bajos.

Respecto a los resultados de cohesión se pueden observar una gran fluctuación en los datos, sin seguir un patrón específico.

La Figura 46 contiene los resultados de ángulo de fricción interna y cohesión correspondientes al suelo sin contaminar y a los 15 y 55 días posteriores de la contaminación con crudo.

Figura 46 Resultados de Resistencia al corte de los todas las muestras de suelo



La figura 46 muestra los resultados correspondiente al ensayo de corte directo, cuyo fin es determinar la resistencia al corte de los suelos. De acuerdo a los resultados obtenidos a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo, se observa una disminución en el ángulo de fricción interna en los suelos contaminados a mayor concentración de crudo, lo cual se justifica por el encapsulamiento que hace el crudo al suelo.

Respecto a los resultados obtenidos a los 55 días después de la respectiva contaminación de las muestra de suelo, se aprecia una tendencia ascendente en relación a ángulo de fricción interna; sin embargo esta disminuye abruptamente en el suelo del 30% a los 55 días.

Se evidencian también resultados muy variables respecto a la cohesión que van desde 0 hasta 1,1602 kg/cm². Los suelos Sb y Sg presentan una Cohesión

próxima a cero. Los suelos contaminados en una concentración por peso igual al 30% presentan cohesiones altas respecto a las demás excluyendo a Se.

Específicamente los suelos Sb y Sg durante la preparación de las muestras para los ensayos de permeabilidad, corte directo y consolidación presentaron un comportamiento muy quebradizo y se rompían con gran facilidad.

Por otro lado adquirirían consistencia, tornándose algunos especímenes en elementos muy duros, ya que al momento de extraer la muestra era muy difícil. Los suelos que presentaban estas tendencias eran Sn, Sd, Se y Sg.

5.8.2 Variación de los resultados respecto al tiempo 15 y 55 días

La Tabla 26 contiene los porcentajes de variación del ángulo de fricción interna y cohesión respecto al tiempo

Tabla 26 porcentajes de variación respecto a la variable tiempo

tipo de suelo	$\varphi(^{\circ})$	% de variación entre tiempos respecto a 15 días	c (Kg/cm ²)	% de variación de SF entre tiempo respecto a 15 días
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	32,53	52,04	0,0712	1529,49
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	49,46		1,1602	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	31,71	76,54	0	100,00
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	55,98		0,0069	

tipo de suelo	$\phi(^{\circ})$	% de variación entre tiempos respecto a 15 días	c (Kg/cm ²)	% de variación de SF entre tiempo respecto a 15 días
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	18,38	229,33	0,0266	100,00
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	60,53		0	
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	22,24	79,45	0,9667	66,30
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	39,91		0,3258	

Tabla 26 describe un aumento en el ángulo de fricción para suelos contaminados con el mismo porcentaje pero analizados en diferente período de tiempo.

Se pueden apreciar los cambios comparativos a partir de un mismo porcentaje de concentración con respecto al tiempo. En el ángulo de fricción interna se alcanza una variación hasta del 229,33% en los suelos contaminado al 15%. Y en los de cohesión se obtienen valores hasta 1529,49%. En todos los casos, varió el valor tanto del ángulo de fricción como de la cohesión con respecto al tiempo. Con esto, puede concluirse que la exposición del crudo en el suelo; durante un tiempo cambia las propiedades de resistencia al corte del suelo de estudio.

Los ensayos de consolidación realizados a las diferentes muestras de suelo y diversos porcentajes y días, indican una arcilla normalmente consolidada

Para una arcilla normalmente consolidada el valor de c es proporcional a σ_v^{68} ,

68 DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Sacramento, California p. 216

De acuerdo a los resultados de cohesión en este proyecto esta afirmación es válida ya que la cohesión que presentan los suelos Sc y Sf son igual a 0; y Los Sn, Sa, Sd, Se y Sh están muy cerca de cero excepto Sb y Sg con valores de 1,1602 y 0,9667 respectivamente.

5.9 ANALISIS DE PERMEABILIDAD EN EL SUELO ARCILLOSO

5.9.1 Suelo contaminado en porcentajes por peso del 5%, 10%, 15% y 30% a los 15 y 55 días.

En la tabla 28, se observan los resultados de los ensayos de Permeabilidad realizados durante el proyecto, además se muestran los porcentajes de variación respecto al Suelo no contaminado.

Se evidencian que los porcentajes de variación respecto Sn son bajos en relación a nT/n20. Sin embargo sucede lo contrario en los valores de KT y K20 pues se evidencian cambios considerablemente altos.

Tabla 27 porcentajes de Variación de los resultados de Permeabilidad respecto Sn para todas las muestras de suelo

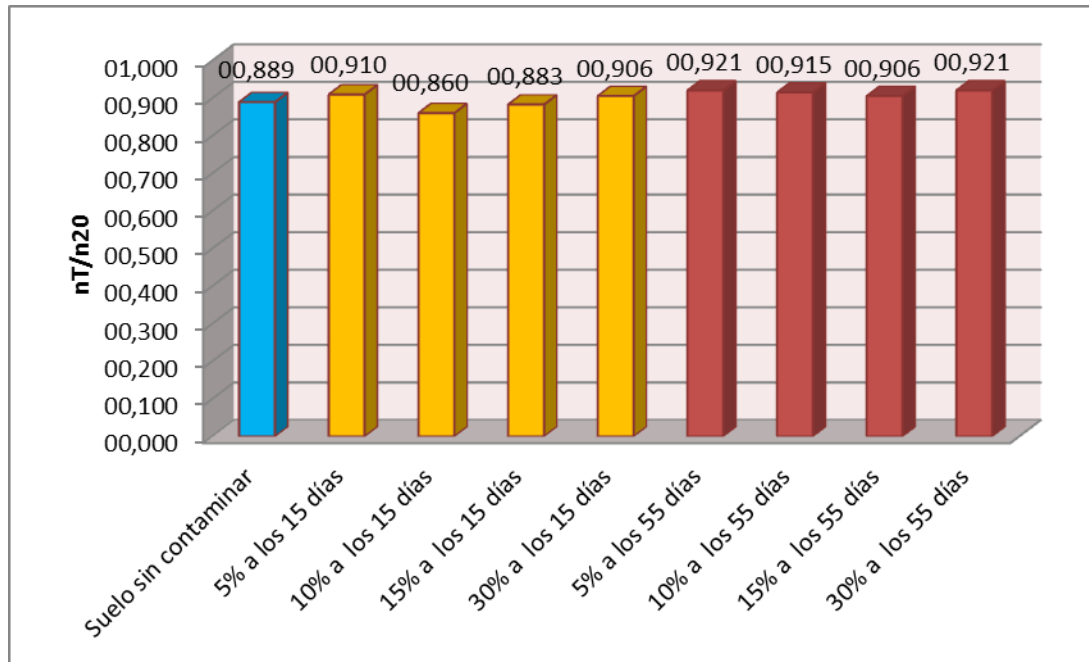
tipo de suelo	PERMEABILIDAD			% variaciones respecto a Sn		
	nT/n20	KT	K20	nT/n20	KT	K20
Suelo no contaminado	0,8893	5,21E-08	4,64E-08	_____	_____	_____
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	0,9097	7,41E-09	6,74E-09	2,29	85,78	85,48
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	0,9206	1,36E-08	1,25E-08	3,51	73,92	72,98

tipo de suelo	PERMEABILIDAD			% variaciones respecto a Sn		
	nT/n20	KT	K20	nT/n20	KT	K20
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	0,8602	2,25E-08	1,94E-08	3,28	56,75	58,29
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	0,9151	8,06E-09	7,38E-09	2,90	84,53	84,09
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	0,8829	1,94E-08	1,71E-08	0,72	62,82	63,18
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	0,9056	5,89E-09	5,34E-09	1,84	88,70	88,50
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	0,9056	1,28E-08	1,16E-08	1,84	75,44	74,97
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	0,9206	5,42E-09	5,02E-09	3,51	89,60	89,19

En nT/n20 s presentan valores que oscilan entre 0,72 y 3,51% respecto a Sn; esto se debe a que durante la ejecución de los ensayos de permeabilidad, no hubo variaciones drásticas en la temperatura del clima.

La Figura 47 contiene los resultados nT/n20 correspondientes al suelo sin contaminar y a los 15 y 55 días posteriores de la contaminación con crudo.

Figura 47 Resultados de n_T/n_{20} para todas las muestras de suelo

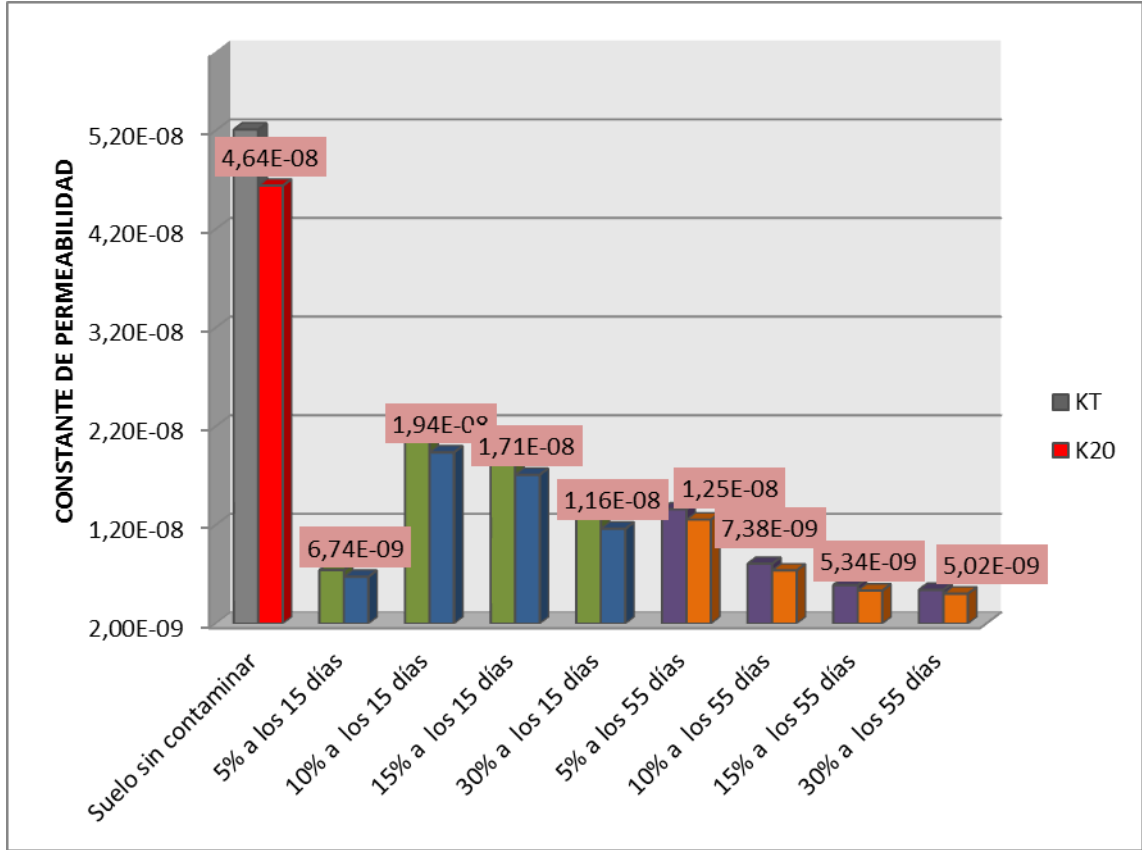


En la Figura 47 se aprecian valores muy similares, con base en las diferentes muestras de suelo. Además se evidencian en algunos casos resultados exactamente iguales, entre ellos está $n_T/n_{20} = 0,9056$, cuyo valor se presenta en los suelos Sd, y Sg; $n_T/n_{20} = 0,9206$ cuyo valor pertenece a Se y Sh . Hecho que significa que la temperatura del agua era aproximadamente la misma en los suelos anteriormente nombrados.

Se evidencia también una baja fluctuación en los datos de la relación n_T/n_{20} lo que representa, que la viscosidad del agua no tuvo cambios drásticos durante la ejecución de los ensayos de permeabilidad; por lo tanto, la variabilidad que presentan los coeficiente de permeabilidad (K_T) de acuerdo con todas las muestras de suelo no son tan afectados por este factor.

La Figura 48 contiene los coeficientes de permeabilidad K_T y K_{20} correspondientes al suelo sin contaminar y a los 15 y 55 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 48 Resultados de K_T y K_{20} para todas las muestras de suelo



El coeficiente de permeabilidad K_{20} es el indicado para realizar el análisis respectivo, ya que este valor se encuentra a una temperatura estándar de 20 grados, a diferencia del K_T puesto que este valor presenta variaciones en la temperatura en cada uno de los ensayos de permeabilidad realizado con excepción de los dos casos anteriormente dichos con un n_T/n_{20} idéntico.

Se evidencia que el suelo sin contaminar es mucho más permeable respecto a las demás muestras de suelo contaminadas con crudo. Se observa una tendencia decreciente en la permeabilidad del suelo a medida que la concentración de hidrocarburo aumenta en el espécimen; a excepción del suelo Sa que muestra una variación abrupta en la capacidad de transmitir un fluido.

El suelo con una permeabilidad menor es el del 30% a los 55 días. Cuyo espécimen presenta el mayor porcentaje de crudo y de días en reposo, respecto a los demás.

5.9.2 Variación del coeficiente de permeabilidad respecto al tiempo 15 y 55 días

La Tabla 28 contiene los porcentajes de variación del coeficiente de permeabilidad K_{20} respecto al tiempo. La tabla 29 evidencia la presencia de crudo en un suelo arcilloso en reposo cambia la permeabilidad del suelo, ya que en la tabla se observan cambios porcentuales significativos respecto al tiempo entre 15 y 55 días. Estos porcentajes de variación decrecen a medida que la concentración de crudo en el suelo aumenta.

Tabla 28 porcentajes de variación de K_{20} respecto a la variable tiempo

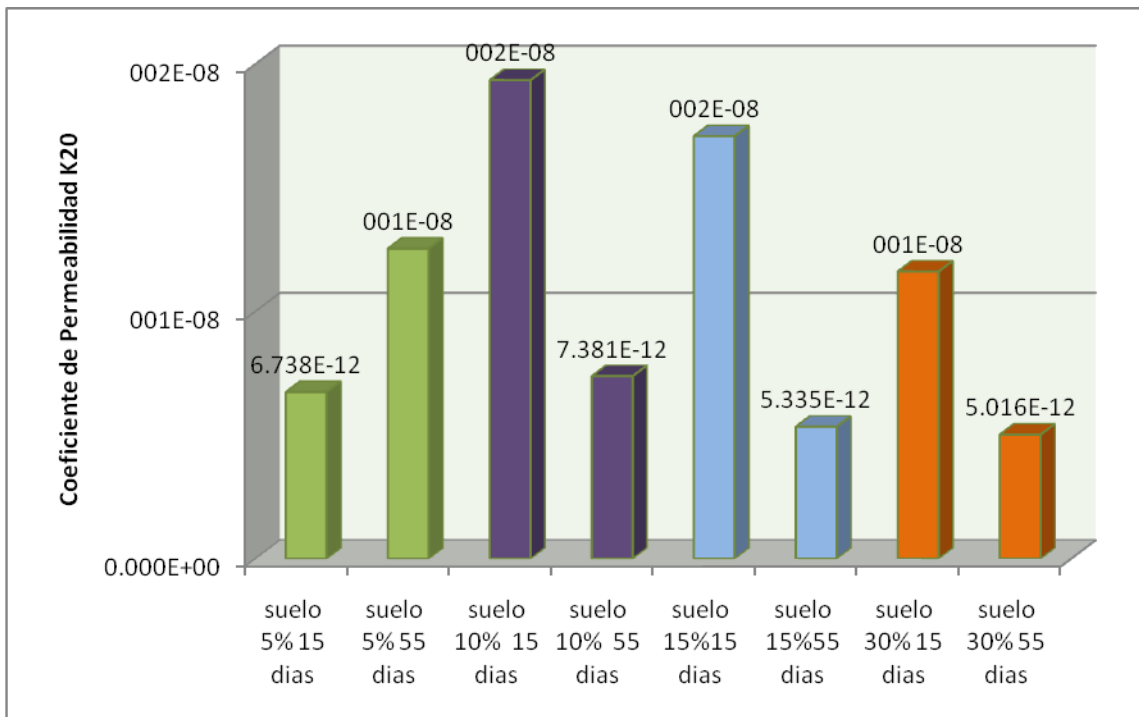
tipo de suelo	K_{20}	% variación respecto al tiempo
Suelo contaminado al 5% a los 15 días	6,74E-09	86,07
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	1,25E-08	
Suelo contaminado al 10% a los 15 días	1,94E-08	61,87
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	7,38E-09	
Suelo contaminado al 15% a los 15 días	1,71E-08	68,77
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	5,34E-09	
Suelo contaminado al 30%	1,16E-08	56,81

tipo de suelo	K ₂₀	% variación respecto al tiempo
a los 15 días		
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	5,02E-09	

Es interesante ver que el suelo con mayor porcentaje de crudo presenta la menor variación y por el contrario el suelo con menor concentración de hidrocarburo (5%) presenta el mayor cambio de permeabilidad respecto al tiempo.

La Figura 49 contiene el resultado de K₂₀ de todas las muestras de suelo contaminadas y se encuentran organizadas de acuerdo al porcentaje de contaminación y tiempo gráficamente.

Figura 49 comparaciones de resultados del K₂₀ entre los tiempos 15 y 55 para cada porcentaje de contaminación



Las muestras de suelo con el mismo porcentaje de contaminación analizadas en diferente periodo de tiempo descienden a medida que pasan los días de 15 a 55 a excepción del suelo del 5% que presenta un aumento en el coeficiente de permeabilidad.

Se describe una fluctuación en los valores de K_{20} respecto al tiempo de 15 y 55 días para cada una de los porcentajes 5, 10, 15 y 30%

Todo tipo de suelo tienden a presentar una permeabilidad determinada de acuerdo a la clasificación del mismo

La tabla 29 indica los valores típicos para diferentes tipos de suelo en estado saturado

Tabla 29 valores típicos para suelos saturados

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava limpia	100-1
Arena gruesa	1.0-0.01
Arena fina	0.01-0.001
Arcilla limosa	0.001-0.00001
Arcilla	0.000001

Fuente⁶⁹

Es importante aclarar que al momento de realizar el ensayo de permeabilidad se saturaron las muestras. De acuerdo a la tabla 29 todos los resultados de coeficiente de permeabilidad (k_{20}) son menores a 0,000001; lo que significa que todos los especímenes presentan una permeabilidad típica a la de una arcilla. La tabla 31 la permeabilidad relativa de un suelo de acuerdo a los valores de k.

⁶⁹ Ibid., p.84.

Tabla 30 de valores relativos de permeabilidad

Permeabilidad Relativa	valores de K (cm ² /seg)	suelo típico
muy permeable	$> 1 \cdot 10^{-1}$	grava gruesa
moderadamente permeable	$1 \cdot 10^{-1}$ a $1 \cdot 10^{-3}$	arena, arena fina
poco permeable	$1 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-5}$	Aren limosa, arena sucia
muy poco permeable	$1 \cdot 10^{-5}$ a $1 \cdot 10^{-7}$	
impermeable	$< 1 \cdot 10^{-7}$	Arcilla

Fuente⁷⁰

Todos los resultados de coeficiente de permeabilidad descritos en la tabla 29 son menores a $1 \cdot 10^{-7}$ por lo tanto los diferentes especímenes de suelo de este proyecto son arcillas impermeables.

5.10 ANALISIS DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL EN EL SUELO ARCILLOSO

Los ensayos de consolidación se realizaron con las siguientes cargas: 0.5, 1, 2 y 4 kg/cm². Los resultados hacen referencia al coeficiente de consolidación C_v , correspondiente a cada carga.

El ensayo de consolidación unidimensional duró varios días por lo que se presentaron inconvenientes con el tiempo. Por lo cual no se pudo realizar este

⁷⁰ Terzaghi, K. y Peck R., 1980. Tabla de valores relativos de permeabilidad. "Citado por". *FUNDAMENTOS TEÓRICOS*: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/permeabilidad.pdf

ensayo a los suelos del 5%, 10% y 15% a los 15 días posteriores a su contaminación. Ya habían sobrepasado los días estipulados para su ejecución.

Los ensayos de consolidación fueron realizados según la INVE-151, la cual se apoya en la Norma ASTM 2435. De acuerdo a esta norma, los resultados muestran a continuación. La Tabla 31 contiene los coeficientes de consolidación para cada carga y los porcentajes de variación con respecto a S_n .

Tabla 31 comparación de los porcentajes de variación C_v respecto al suelo sin contaminar

Tipo de suelo	COEFICIENTE DE CONSOLIDACION PARA CADA CARGA				porcentaje de variación respecto a S_n			
	0,5 kg/cm ²	1 kg/cm ²	2 kg/cm ²	4 kg/cm ²	0,5 kg/cm ²	1 kg/cm ²	2 kg/cm ²	4 kg/cm ²
Suelo no contaminado	0,1625	0,4686	0,1904	0,2787	-----	-----	-----	-----
Suelo contaminado al 30% a los 15 días	0,2043	0,0808	0,0543	0,0334	25,75	82,76	71,50	88,00
Suelo contaminado al 5% a los 55 días	0,0711	0,1579	0,0296	0,0202	56,21	66,31	84,47	92,76
Suelo contaminado al 10% a los 55 días	0,0725	0,0791	0,0706	0,0456	55,35	83,12	62,93	83,64
Suelo contaminado al 15% a los 55 días	0,2615	0,0858	0,0665	0,0315	60,96	81,69	65,07	88,70

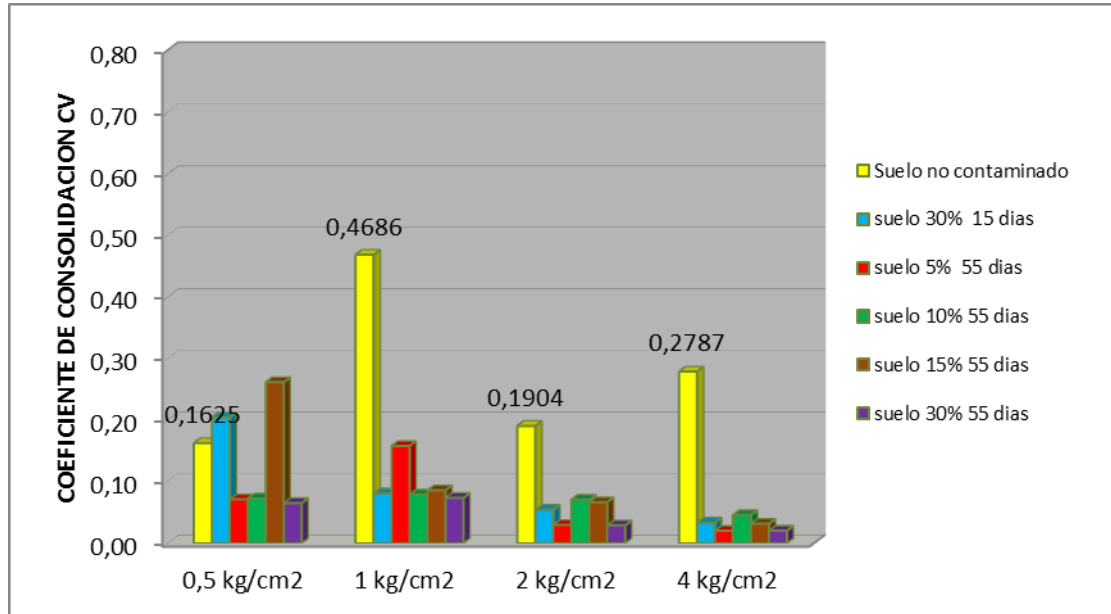
Suelo contaminado al 30% a los 55 días	0,0653	0,0736	0,0289	0,0203	59,81	84,30	84,82	92,72
---	--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	-------

En la tabla 31 se aprecian los porcentajes de variación de la consolidación unidimensional de los suelos correspondientes a los ensayos realizados a los 15 y 55 días después de la contaminación. Respecto al suelo del 30% a los 15 días después de su contaminación se presentan variaciones altas respecto a S_n que van desde 25,75% hasta 88% entre las cargas.

De acuerdo a las muestras de suelo 15 y 55 días después de su contaminación se observa una mayor fluctuación de los resultados respecto a S_n en la carga de 0,5 kg/cm², ya que el porcentaje de variación varía entre 25,75% y 60,96%.

La Figura 50 contiene los resultados de consolidación que corresponden a los coeficientes de consolidación para cada carga gráficamente.

Figura 50 resultados de consolidación para todas las muestras de suelo



El suelo no contaminado y los tres suelos con mayor presencia de crudo presentan una tendencia descendente en las cargas 2 y 4 kg/cm².

Los suelos del 5 y 10% a los 55 días presenta un valor muy similar de Cv en la carga de 0,5 kg/cm² igual sucede con los suelos del 30% a los 15 días y del 10% a los 55 días en la carga de 1 kg/cm².

El menor valor respecto a los demás se manifiesta en el suelo del 5% a los 55 días en la carga de 4 kg/cm².

Ademas, es evidente como la presencia de crudo en el suelo varia los coeficientes de consolidación de un suelo en estado normal, sin embargo estas variaciones no siguen un patrón específico.

Todos los suelos dieron en los resultados de consolidación muestras normalmente consolidadas.

6. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaron las variaciones mecánicas de los límites de Atterberg, la gravedad específica, la capacidad cortante del suelo, la permeabilidad y en la consolidación de un suelo de naturaleza arcillosa afectado por derrame de crudo. Los tipos de suelo analizados fueron:

Suelo sin contaminar:	Sn
Suelo contaminado con un 5% de crudo a los 15 días	Sa
Suelo contaminado con un 10% de crudo a los 15 días	Sb
Suelo contaminado con un 15% de crudo a los 15 días	Sc
Suelo contaminado con un 30% de crudo a los 15 días	Sd
Suelo contaminado con un 5% de crudo a los 55 días	Se
Suelo contaminado con un 10% de crudo a los 55 días	Sf
Suelo contaminado con un 15% de crudo a los 55 días	Sg
Suelo contaminado con un 30% de crudo a los 55 días	Sh

Respecto al ensayo del límite líquido de los suelos

- Los resultados preliminares indican que la concentración del 10% de suelo es la que menos cambios tienen con respecto al suelo testigo Sn y que concentraciones superiores afectan significativamente este límite líquido. Además concentraciones mayores al 15% los suelos tienen a disminuir su límite líquido a medida que pasa el tiempo. Tanto el suelo inicial, como el suelo contaminado arrojaron como resultado un suelo de baja compresibilidad; a excepción de los suelos contaminados con un porcentaje del 15 y 30% después de 15 días de la mezcla suelo+ crudo.

- El límite líquido en los suelos contaminados presento grandes variaciones con respecto al suelo sin contaminar posiblemente debido a las distintas concentraciones de hidrocarburo empleadas.
- Los suelos contaminados con el 15 y 30 % presentaron variaciones de más del 50% respecto a su estado libre de contaminante, en la norma INV E-125 se estipula un porcentaje de variación máximo del 13% entre 2 resultados del mismo ensayo el único suelo que cumple esto es el suelo contaminado al 10% a los 55 días. Es notable el cambio generado en las propiedades del suelo por el hidrocarburo.
- El suelo sin contaminar fue clasificado mediante la carta de plasticidad como una arcilla inorgánica de baja compresibilidad sin embargo en los suelos Sc y Sd con altas concentraciones de contaminante 15 y 30 % la clasificación cambio a de baja a alta compresibilidad.

Respecto al ensayo del límite plástico de los suelos

- Los valores de Lp se encuentran dentro de un rango aproximado de 18,7% y 24,59%, y que el valor del Lp en todos los suelos estuvo por encima del Lp del suelo no contaminado (Sn). Los resultados preliminares parecen indicar que concentraciones por debajo del 10% de crudo están ocasionando un descenso del valor del Lp, mientras concentraciones mayores sufren un incremento. Esto puede explicarse si se considera que el crudo causa un agrupamiento de las partículas de suelo, repele el agua afectando con ello el comportamiento plástico que pudiera tener.
- En algunas arcillas, el límite plástico varía normalmente en la misma dirección del líquido, pero sus variaciones suelen ser solo del orden de un tercio de las del límite líquido. Hecho que da a entender que las

variaciones, en los ensayos de límites líquidos suelen ser mayores a las de límite plástico. Esta afirmación se confirma en los ensayos practicados en el proyecto excepto en el suelo contaminado a una concentración (gr/gr) del 5%:

- La clasificación inicial del suelo era arcillo-limos CL Arcilla Inorgánica de baja compresibilidad; sin embargo, las muestras de suelo Sc, Sd y Sh muestran un Suelo Arcillo de alta compresibilidad. Lo que se le puede atribuir al alto grado de crudo en los suelos. Puesto que los especímenes que demuestran estos cambio son los que presentan mayor concentración de hidrocarburo en porcentaje y peso. Si bien el suelo contaminado al 15% a los 55 días no presenta este hecho, es importante aclarar que el límite líquido era de 45%.
- Los suelos contaminados presentaron un aumento en su plasticidad respecto al suelo base.
- Se presento un aumento significativo en el suelo Sh que presento una variación del 31%. Cabe resaltar que fue el suelo que tuvo la más alta concentración de crudo y su mayor exposición 55 días.
-
- Los resultados de plasticidad no presentan ningún patrón específico de cambio.
- La variación de los resultados entre los mismos suelos respecto al tiempo no generan una variación superior a un 15%

Respecto al ensayo de la determinación de los factores de contracción del suelo

- Se evidencia que los ensayos practicados al suelo del 30% de contaminación presentan los valores más altos en esta prueba. Adicionalmente, que el suelo sin contaminar presenta la relación de contracción más alta lo cual pudiera ser explicable considerando que los suelos sin contaminar presentan sus partículas dispuestas a acomodarse, en cuanto los contaminados sufren un comportamiento diferente por el encapsulamiento que hace el crudo. Los resultados preliminares están indicando que el límite de contracción del suelo desciende a medida que pasa el tiempo, queda por demostrar, si dejando la muestra de suelo más tiempo, puede el suelo llegar a tener un valor cercano al inicial.
- Los resultados presentan fluctuaciones sin patrones específicos de cambio y sin una relevante variación en su magnitud
- Se observó una disminución en el límite de contracción del suelo contaminado con el 10% de hidrocarburo y una baja relación de contracción en el suelo contaminado al 30%.
- Los cambios respecto al tiempo de exposición al contaminante no presentan una mayor oscilación entre ellos.
- La norma INVE-127 habla de una diferencia máxima del 6.8 % entre los límites aceptables de 2 resultados, los suelos presentaron una variación máxima del 3,32% por lo que cumplen las condiciones establecidas en la norma.

Respecto al ensayo de Gravedad Específica de los suelos

- Se observa que el valor de la gravedad específica en todos los casos descendió, con variaciones significativas en porcentajes por encima del 10% de contaminación del crudo en el suelo.
- Sin embargo, los resultados de gravedad específica no siguen un patrón definido en donde se puedan establecer una correlación entre dos tipos de muestra que posean aspectos similares.
- Respecto al suelo no contaminado se observa un cambio de la gravedad específica moderadamente alto dentro de un rango de 17,16 y 34,92%. Cuyos valores pertenecen a Sa y Sg respectivamente.
- los porcentajes de variación son moderadamente altos a excepción del suelo contaminado al 30% con un 3,94% de cambio entre los 15 y 55 días.
- El suelo contaminado en un 10% de concentración por porcentaje en peso de crudo presenta la mayor variación respecto al suelo no contaminado con un 17,18%.
- Todos los resultados obtenidos se encuentran por fuera del rango establecido para arcillas inorgánicas

Con respecto al ensayo modificado de compactación

- Se evidencia una gran fluctuación en los porcentajes de variación respecto a Sn, ya que estos cambios se encuentran dentro del rango 3,03% y 66,67%, hecho que evidencia que la adicción de crudo al suelo cambia esta propiedad.

- El único suelo que no presenta mayor variación respecto al suelo no contaminado es el del 5% a los 15 días. Por otro lado se puede apreciar que la humedad óptima del suelo sin contaminar es la mas alta.
- Además el suelo con mayor concentración de crudo (30%) presenta en ambos tiempos humedades óptimas bajas, con base a las demás. Los resultados permiten inferir que el crudo está afectando directamente la humedad óptima del suelo.
- Se evidencian cambios sustanciales en las humedades óptimas lo que significa que el porcentaje de crudo afecta directamente la humedad óptima del suelo.
- La variación de los resultados con respecto al S_n presentan un patrón de cambio de disminución en la humedad óptima según la cantidad de crudo presente en el suelo
- Los cambios respecto al tiempo entre los resultados de un mismo suelo no presentan magnitudes significativas a excepción del suelo contaminado al 30% que presento una variación del 48%

Con respecto al ensayo de corte directo en el suelo arcilloso

- se observa un aumento en el ángulo de fricción interna en los suelos contaminados a mayor concentración de crudo, lo cual se justifica por el encapsulamiento que hace el crudo al suelo. En todos los casos, varió el valor tanto del ángulo de fricción como de la cohesión con respecto al tiempo. Con esto, puede concluirse que la exposición del crudo en el suelo; durante un tiempo cambia las propiedades de resistencia al corte del suelo de estudio.

- Se presentaron fluctuaciones en los resultados obtenidos para cohesión y ángulo de fricción posiblemente debido a la falta de uniformidad en el suelo. al no poder garantizar que cada muestra tuviera la misma cantidad de hidrocarburo.
- Se observó una gran influencia por parte del hidrocarburo en el aumento abrupto del ángulo de fricción interna respecto al suelo sin contaminar con porcentajes de aumento del 800%
- Los suelos reflejan una tendencia ascendente de la resistencia al cortante a mayor tiempo de contaminación con la excepción del suelo Sh que presentó una gran disminución en este con respecto al ensayo a los 15 días.
- La cohesión aumenta en los suelos con un porcentaje de contaminación mayor al 15% y disminuye en los suelos menores al 10% de acuerdo al tiempo de exposición de crudo en las muestras.
- Se obtienen cohesiones muy bajas, algunas incluso de 0, exceptuando los suelos contaminados en una concentración por peso igual al 30% que presentan cohesiones altas respecto a las demás excluyendo a Se

Con respecto al ensayo de permeabilidad de los suelos

- Se evidencia que el suelo sin contaminar es mucho más permeable respecto a las demás muestras de suelo contaminadas con crudo. Se observa además una tendencia decreciente en la permeabilidad del suelo a medida que la concentración de hidrocarburo aumenta en el espécimen; a excepción del suelo Sa que muestra una variación abrupta en la capacidad de transmitir un fluido.

- viscosidad del agua no tuvo cambios drásticos durante la ejecución de los ensayos de permeabilidad; por lo tanto, la variabilidad que presentan los coeficientes de permeabilidad (K_T) no se ven tan afectados por la temperatura de agua.
- Se presentan cambios considerables en los coeficientes K_T y K_{20} presentando una tendencia ascendente, debido a la adición de crudo el suelo tiende volverse impermeable reduciendo la velocidad del caudal que puede pasar por la muestra con esto se disminuye considerablemente su permeabilidad.

Con respecto a la consolidación unidimensional de los suelos

- El suelo del 30% a los 55 días posteriores de su contaminación presenta variaciones en el orden de 25,75% hasta 88% en los resultados respecto al suelo no contaminado.
- Los suelos 30% a los 15 días, 15 y 30% a los 55 días después de la contaminación presentan una tendencia descendente en las cargas realizadas a 2 y 4 Kg/cm²
- Se evidencia como la presencia de crudo en el suelo varia los coeficientes de consolidación de un suelo en estado normal, sin embargo estas variaciones no siguen un patrón específico.

En General

- Las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos se ven afectadas por la presencia de un contaminante. En este caso, el contaminante fue el crudo

proveniente de locaciones petroleras. Este tipo de estudio debe continuarse, aumentando el número de muestras de suelo ensayadas con el fin de verificar el nivel de afectación de estas propiedades, con el fin de plantear soluciones de remediación según sea el uso del suelo.

- Gracias a los ensayos realizados es posible afirmar que los hidrocarburos afectan y varían las propiedades mecánicas del suelos arcillosos.
- Cuando se presenta un derrame es necesario ejecutar procesos de remediación inmediata en el suelo puesto que con el transcurso de tiempo este sufrirá grandes cambios en lo que respecta a sus características mecánicas.

7. RECOMENDACIONES

Para los ensayos de límite plástico, límite líquido y contracción se recomienda mezclar el suelo en cantidades pequeñas para facilitar la absorción del agua por el suelo contaminado.

Para realizar el secado del suelo contaminado es recomendado el uso de hornillas eléctricas como medida de seguridad y con el fin de evitar la incineración del suelo y la pérdida de este.

En el ensayo de permeabilidad debido a las propiedades impermeables que adquiere el suelo afectado por el hidrocarburo, se recomienda llevar un seguimiento minucioso del ensayo para observar posibles fenómenos que se puedan presentar en este.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BORONAT, Jordi y SALA, Miriam. Contaminación de suelos. Herramientas técnicas para la identificación de responsabilidades históricas. [en línea]. [Consultado 7 sep. 2010]. Disponible en <<http://www.togas.biz/articulos/Derecho-Administrativo/Medio-Ambiente/Contaminacion-de-suelos--Herramientas-tecnicas-para-la-identificacion-de-responsabilidades-historicas.htm>>
- BOWLES, Joseph E. Manual de Laboratorio De suelo en Ingeniería Civil. Bogota: McGRAW-HILL Latinoamericana, S.A, 1980.
- CASTRO PARDO Jenny Liliana, ROJAS PERDOMO Maria Carolina y BENAVIDES LOPEZ DE MESA Joaquin L. Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo.[en línea] [consultado 12 oct. 2011]. Disonible en <http://www.unicolmayor.edu.co/invest_nova/NOVA/artorig4_2.pdf>
- COLMENARES TOVAR, Edilverto. Evaluación de los métodos de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos: aplicación Distrito de producción el centro. México. Monografía. Ecopetrol, 36 p .
- Contaminación por derrames de petróleo... En: Por primera vez en Colombia una entidad como la Defensoría del Pueblo puso el dedo en la yaga en una de las más perjudiciales formas de contaminación de que ha sido víctima el país: la generada por derrames de petróleo. [en línea] Disponible en <<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-555907>>

- CRESPO VILLALAZ, Carlos Mecánica de Suelo y Cimentaciones. México D.F: Limusa, 2004. 650 p.
- CUADRILLAS DE TRABAJADORES intentan contener derrames en el Catatumbo. En: Empleados, tanto de Ecopetrol como de Petróleos del Norte, lo intentan, en dos puntos diferentes. [en línea] ; (2011). [consultado 6/07/2012]. Disponible en < http://www.eltiempo.com/colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-9260922.html>
- DAS, Braja M. Fundamentos de Ingenieria Geotecnica. Sacramento, California: 594 p.
- GARCIA ROMERO, Emilia y SUAREZ BARRIOS, Mercedes. LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS. En: Yacimientos minerales. [en línea]. [Consultado 15 jul. 2012]. Disponible en < <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm>>
- HANSON, Bradford & Bradley Robert, The louisiana department of natural resources , BLACK GOLD beneath the bayous [CD-ROM]: Version 1.0, 1999.
- SISTEMA DE CLASIFICACION de suelos unificado. En: Ingeniero Civil. [en línea]. [consultado 3 jul. 2012]. Disponible en <http://www.ingenieriaciviltips.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos_13.htm>
- . CLASIFICACION DE SUELOS. [en línea]. [consultado 28 jun. 2012]. Disponible en < http://www.icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases.../05_terzaghi_3.pdf >, 20 p.

- MECANICA DE SUELOS. En: Zona Ingeniería. [en línea]. [consultado 3 jul. 2012]. <<http://www.entradas.zonaingenieria.com/2009/05/mecanica-de-suelos-toma-de-muestras.html>>
- Instituto Nacional de Vías. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras: Especificaciones y Normas INV-07. Bogotá: 2007. (INVE E-07).
- Jahn, Mark; Cook, Mark & Graham, Mark. DEVELOPMENTS IN PETROLUM SCIENCE: HYDROCARBON EXPLORATION AND PRODUCTION. United kingdom: Elsevier Science, 1998. p.9.
- JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tomo 1. México D.F: Limusa S.A. De C.V. Grupo Noriega Editores, 2005, 642.p
- LAMBE, William y WHITMAN, Roberth. MECANICA DE SUELOS. México D.F: Limusa: Noriega Editores, 1994. 538.p
- MALAGON CASTRO, Dimas. Los Suelos de Colombia. En: Sociedad Geográfica de Colombia. [en línea]. [consultado 1 jul. 2012]. Disponible en <<http://www.sogeocol.edu.co/portit.htm>>, p. 1.
- NADEO, Julio Roberto y LEONI, Augusto José. Introducción a Algunas Propiedades Fundamentales de los Suelos. [en línea]. [consultado 3 jul. 2012]. Disponible en < www.ing.unlp.edu.ar/.../...>, p. 18. de 62
- ORTIZ BERNAD, Irene ., et al. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. En: Informe de vigilancia tecnológica [en línea] . No.6 (2007). [consultado en 1 . jul. 2012] Disponible en

<http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf>

- RICALDONI, Julio. Tablas y abacos. En: Curso de Geología de Ingeniería e Introducción a la Mecánica de Suelos. [en línea]. (2008);p.4 [Consultado 15 jul. 2012]. Disponible en <http://www.fing.edu.uy/iet.old/areas/geotecnica/cursos/mec_suelos/material_d/tablas_abacos_08.pdf>
- RISER-Robert, Eve. Remediation of Petroleum Contaminated Soils: Biological, physical and chemical processes. Lewis publishers, 1998, 542 p.
- ROZO, Eduardo. La Crisis del Río Pamplonita. [en línea] .[Consultado 10/05/2012]. Disponible en <http://www.riourbano.org/index.php?option=com_content&view=article&id=22:crisisdelriopamplonita&catid=3:actualidad&Itemid=12>
- SANTAMARÍA DAZA, Ricardo. Oferta de taladros petroleros en Colombia aumentó más de 40 por ciento este año. [en línea]. [consultado 13 nov. 2010]. Disponible en <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:OJx3aSLRKeIJ:www.oilproduction.net/cms/index.php%3Fopcion%3Dcom_content%26view%3Darticle%26id%3D1445:oferta-de-taladros-petroleros-en-colombia-aumento-mas-de-40-por-ciento-este-año%26catid%3D53:notas-de-opinion%26Itemid%3D110+aumento+la+industria+petrolera+en+colombia&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=co>
- SERRANO, Marlon y RESTREPO, Ricardo. Fitorremediación una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.

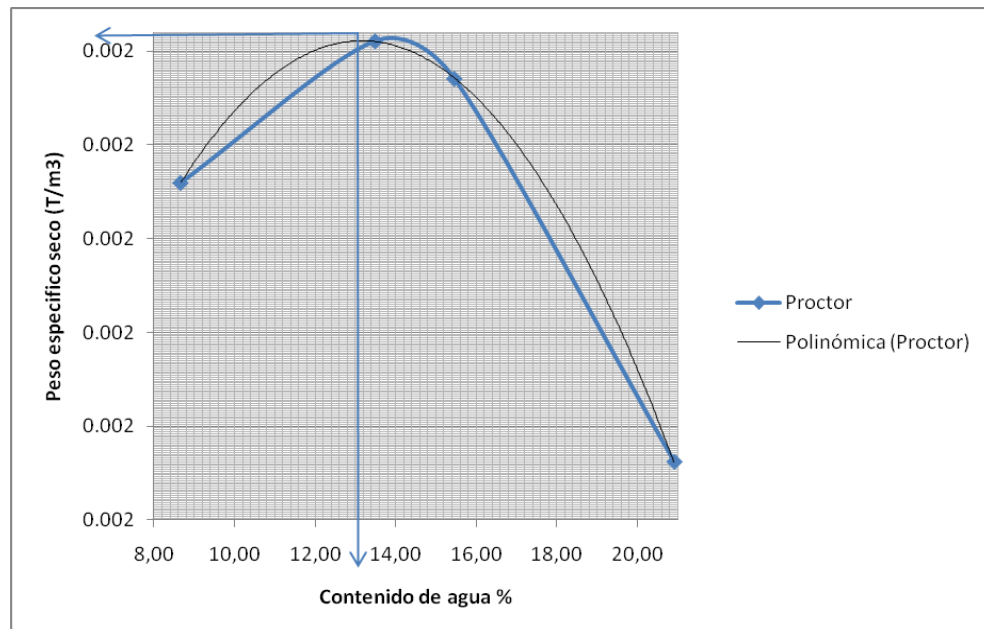
Bucaramanga, 2006, 79 p. Tesis (Especialista en química ambiental).
Universidad industrial de Santander. Escuela de química.

ANEXOS

Anexo A. Con respecto al Ensayo modificado de compactación

Tabla de datos correspondiente al ensayo modificado de compactación para suelo no contaminado

Molde No	Nuevo
Volumen (cm ³)	2400,62
Peso (gr)	5268
Peso Martillo (gr)	1000
Altura caída (cm)	18
No de capas	5
No de golpes por capa	56
Altura	13,23
Diámetro molde	15,2



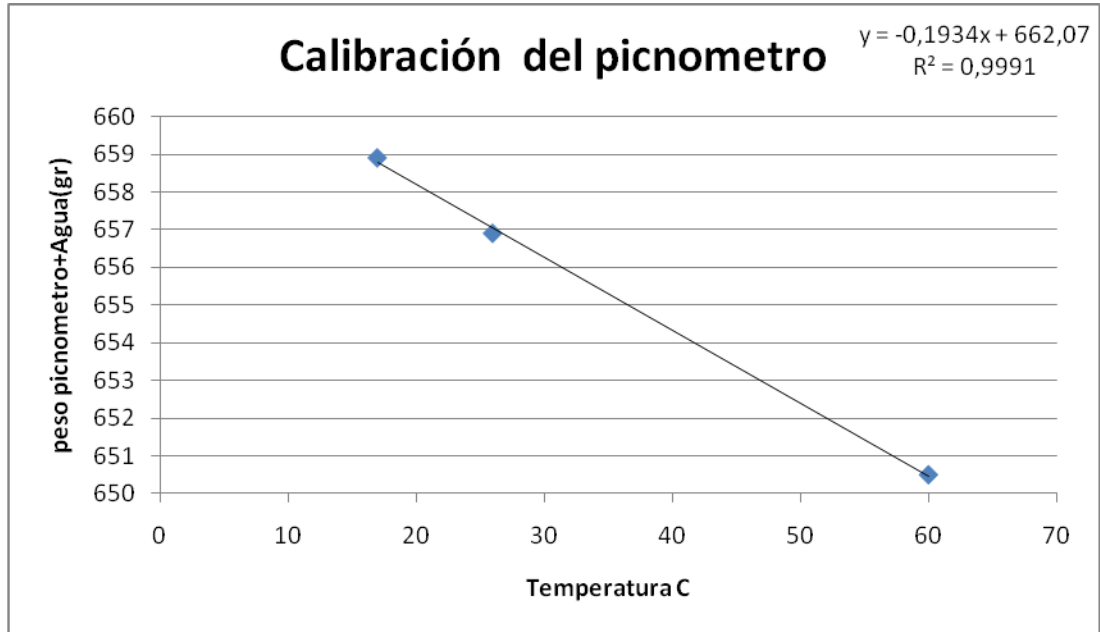
Humedad óptima : 13.20 %

Tabla cálculos realizados.

determinación No	1	2	3	4
peso molde+ suelo húmedo (gr)	9911	10323	10355	10002
peso molde (gr)	5268	5268	5268	5268
peso suelo húmedo (gr)	4643	5055	5087	4734
peso especifico húmedo (T/M3)	1,934	2,106	2,119	1,972
Capsula No	115	47	104	6
peso capsula+ suelo húmedo (gr)	55,86	40,23	54,53	60,42
peso capsula + suelo seco (gr)	51,95	36,26	48,27	51,18
peso del agua (gr)	3,91	3,97	6,26	9,24
peso capsula (gr)	6,84	6,83	7,76	6,99
peso suelo seco (gr)	45,11	29,43	40,51	44,19
contenido de agua (%)	8,668	13,490	15,453	20,910
peso especifico seco (T/m3)	1,780	1,855	1,835	1,631

Anexo B con respecto a la Gravedad Específica de los suelos

para la realización de este ensayo era necesario la implementación de un picnómetro y la calibración del mismo, a continuación la gráfica de calibración del picnómetro escogido y utilizado durante cada ensayo.



Con la ecuación de la gráfica se obtenía en el ensayo la temperatura correspondiente y se reemplazaba para obtener el peso del picnómetro adecuado.

Tabla de Calculo realizados para obtener el peso especifico.del suelo no contaminado.

Peso especifico relativo	
Wbws	732,7
Temperatura C	27
Wbw	656,8
peso cap+ SC	307,6
Peso capsula	196,6
peso del suelo seco (ws)	111
$Ww=Wbw+Ws-Wbws$	35,1
Peso especifico=	3,153

En donde :

Wb: peso del matraz vacio y seco

Wbw: Peso del matraz vacio hasta la marca

Wbws: Peso del matraz + agua + suelo

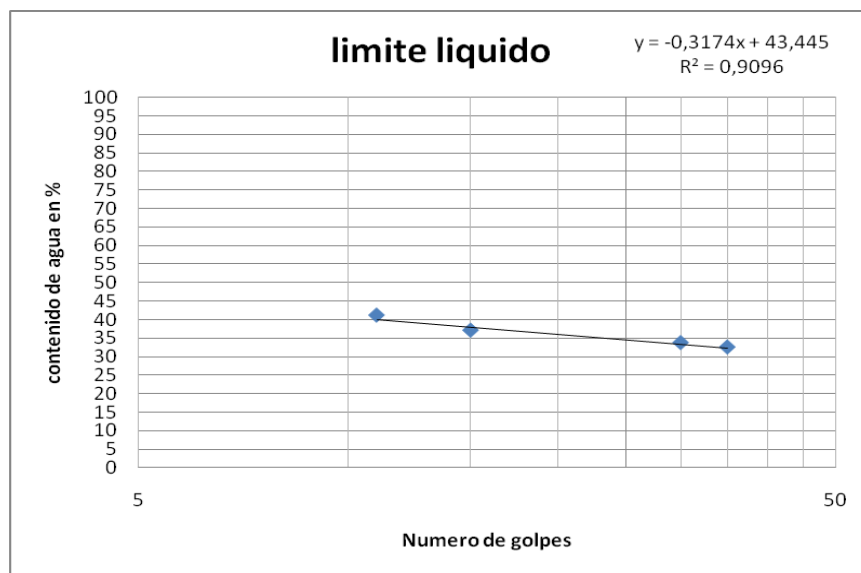
Ws: peso del suelo seco

Ww: peso de agua desplazada

Anexo C Con respecto a la Determinación Límite líquido de los suelo

Se realizó la gráfica correspondiente a Numero de Golpes versus contenido de Agua%, y se halló el gráficamente el límite líquido localizado a los 25 golpes.

Tabla corresponde a la ecuación del límite líquido del suelo no contaminado.



Límite líquido: 35,5

Tabla de datos y calculos correspondientes

Capsula No	Numero de goles	prom golpes	No
	15		15
	11		11
	35		35
	30		30

Peso capsula+suelo húmedo	peso capsula+suelo seco	peso del agua	peso de la capsula	peso del suelo seco	contenido de agua (W)
gr	gr	gr	gr	gr	gr
27,28	22,7	4,58	10,38	12,32	37,18
38,64	33,07	5,57	19,56	13,51	41,23
36,85	31,86	4,99	16,58	15,28	32,66
40,88	35,93	4,95	21,3	14,63	33,83

Anexo D Con respecto a la Determinación del Límite plástico de los suelos

Límite plástico para la muestra de suelo no contaminado

Tabla de cálculos correspondientes

Capsula No	Peso capsula+suelo húmedo	peso capsula+suelo seco	peso del agua	peso de la capsula	peso del suelo seco	contenido de agua (W)
3	gr	gr	gr	gr	gr	gr
89	23,35	20,71	2,64	6,86	13,85	19,0613718
45	25,48	22,56	2,92	6,79	15,77	18,5161699

Límite plástico : 18,78

Anexo E. Con respecto a la Determinación de los factores de contracción

Tablas de calculos tipo para determinar los factores de contraccion en la muestra de suelo no contaminado.

Capsula No	Peso Capsula + suelo hum	Peso Capsula + suelo seco	Peso de la Capsula	Peso del agua	Peso del Suelo Seco al horno	Contenido de Agua
----	gr	gr	gr	gr	(Wo) gr	(W) %
4	48,87	41,4	23,43	7,47	17,97	41,57
3	45,72	38,1	20	7,62	18,1	42,10

	Capsula No	Peso Mercurio+ Recipiente	Peso Recipiente	Peso Mercurio	Densidad Mercurio	Volumen Mercurio	
	----	gr	gr	gr	gr/cm3	cm3	
Capsula	4	217,73	23,32	194,41	13,53	14,37	V1
	3	211,6	19,94	191,66	13,53	14,17	V1
Muestra seca	4	239,2	113,8	125,4	13,53	9,27	V2
	3	285,6	156,6	129	13,53	9,53	V2

Capsula No	4	3
Limite de Contraccion Sw (%)	13,19	16,51
Relacion de Contraccion Sr	1,94	1,90
Gravedad Especifica Aprox Gs	2,60	2,77

$$Gravedad Especifica Aprox: G_s = \frac{W_s}{v_1 * \gamma_w - W_w}$$

ANEXO F. Con respecto a la Determinación de la resistencia al corte

Determinación de la resistencia al corte, correspondiente a la muestra de suelo tipo (S6).

Tabla de Cálculo de la determinación de la resistencia al corte para la muestra de suelo contaminado al 15% a los 15 días.

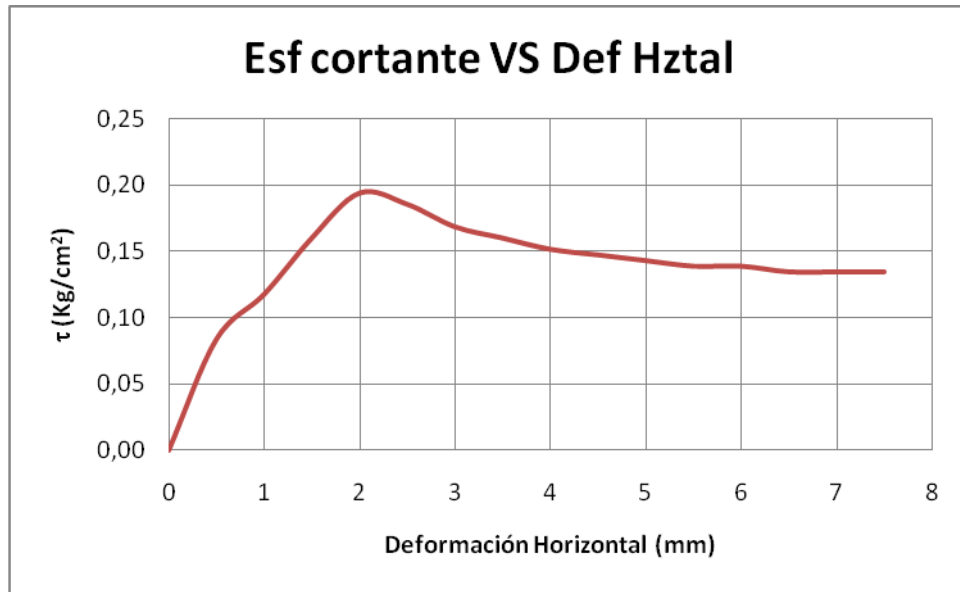
AREA MUESTRA (cm ²)=	36
Peso muestra +molde (g)=	269,54
Peso molde (g)=	148,65
Altura muestra (cm)=	1,9
Cápsula No	59
Peso cápsula (g)=	21,32
Peso cápsula + suelo húmedo (g)=	74,07
Peso cápsula + suelo seco (g)=	70,46

Humedad (%)=	7,3
ρ (g/cm ³)=	1,77
ρ_d (g/cm ³)=	1,65

σ (Kg/cm ²)=	0,5
---------------------------------	-----

Vel (mm/min)=	1
tmax(Kg/cm ²)=	0,19

TIEMPO (min)	Lectura de Carga	Def Horizontal (mm)	Def Vertical $2 \cdot 10^{-3}$ (mm)	P (Kg)	\square (Kg/cm ²)
0,0	0	0,0	0	0	0,00
0,5	3	0,5	-38	3,02	0,08
1,0	7	1,0	-62	4,25	0,12
1,5	12	1,5	-76	5,78	0,16
2,0	16	2,0	-70	7,00	0,19
2,5	15	2,5	-42	6,70	0,19
3,0	13	3,0	-10	6,08	0,17
3,5	12	3,5	18	5,78	0,16
4,0	11	4,0	28	5,47	0,15
4,5	10,5	4,5	50	5,32	0,15
5,0	10	5,0	62	5,17	0,14
5,5	9,5	5,5	82	5,01	0,14
6,0	9,5	6,0	90	5,01	0,14
6,5	9	6,5	100	4,86	0,13
7,0	9	7,0	108	4,86	0,13
7,5	9	7,5	116	4,86	0,13



AREA MUESTRA (cm ²)=	36
Peso muestra +molde (g)=	268,39
Peso molde (g)=	153,17
Altura muestra (cm)=	1,9
Cápsula No	19
Peso cápsula (g)=	21,25
Peso cápsula + suelo húmedo (g)=	59,52
Peso cápsula + suelo seco (g)=	56,81

Humedad (%)=	7,62
ρ (g/cm ³)=	1,68
ρ_d (g/cm ³)=	1,57

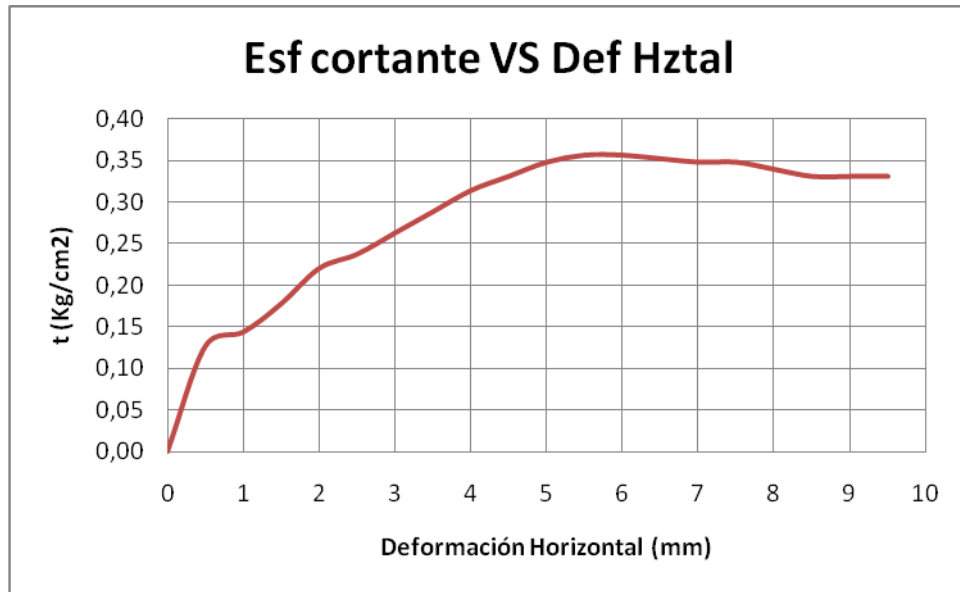
ρ	1
--------	---

(Kg/cm²)=

Vel (mm/min)=

σ_{\max} (Kg/cm²)=

TIEMPO (min)	Lectura de Carga	Def Horizontal (mm)	Def Vertical $2 \cdot 10^{-3}$ (mm)	P (Kg)	σ (Kg/cm ²)
0,0	0	0,0	0	0	0,00
0,5	8	0,5	-140	4,55	0,13
1,0	10	1,0	-208	5,17	0,14
1,5	14	1,5	-298	6,39	0,18
2,0	19	2,0	-360	7,92	0,22
2,5	21	2,5	-402	8,53	0,24
3,0	24	3,0	-450	9,45	0,26
3,5	27	3,5	-490	10,37	0,29
4,0	30	4,0	-540	11,29	0,31
4,5	32	4,5	-546	11,90	0,33
5,0	34	5,0	-548	12,51	0,35
5,5	35	5,5	-544	12,82	0,36
6,0	35	6,0	-540	12,82	0,36
6,5	34,5	6,5	-532	12,67	0,35
7,0	34	7,0	-528	12,51	0,35
7,5	34	7,5	-518	12,51	0,35
8,0	33	8,0	-510	12,21	0,34
8,5	32	8,5	-490	11,90	0,33
9,0	32	9,0	-470	11,90	0,33
9,5	32	9,5	-460	11,90	0,33

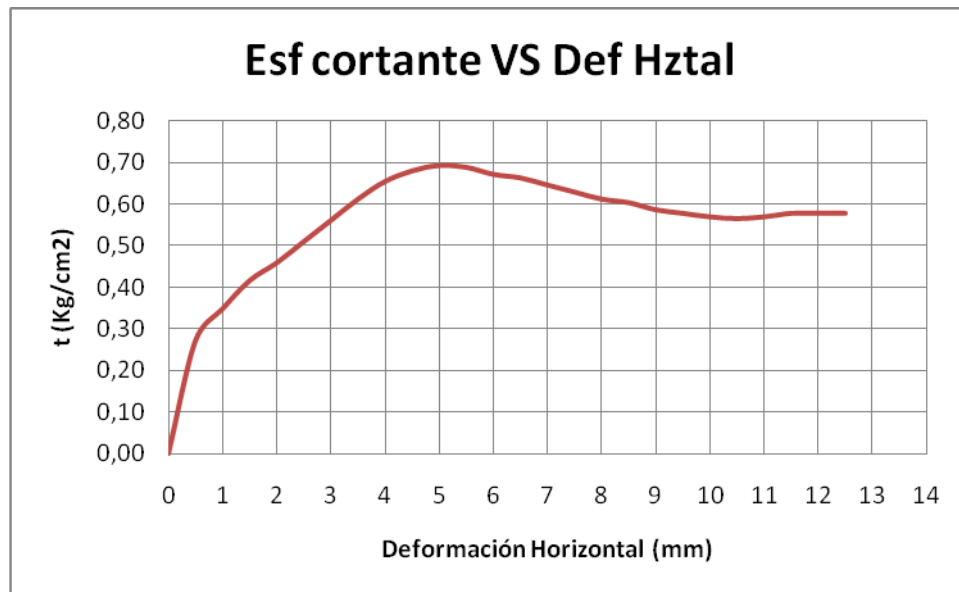


AREA MUESTRA (cm ²)=	36
Peso muestra +molde (g)=	278,36
Peso molde (g)=	155,51
Altura muestra (cm)=	1,92
Cápsula No	2
Peso cápsula (g)=	18,93
Peso cápsula + suelo húmedo (g)=	73,59
Peso cápsula + suelo seco (g)=	69,58

Humedad (%)=	7,9
ρ (g/cm ³)=	1,78
ρ_d (g/cm ³)=	1,65

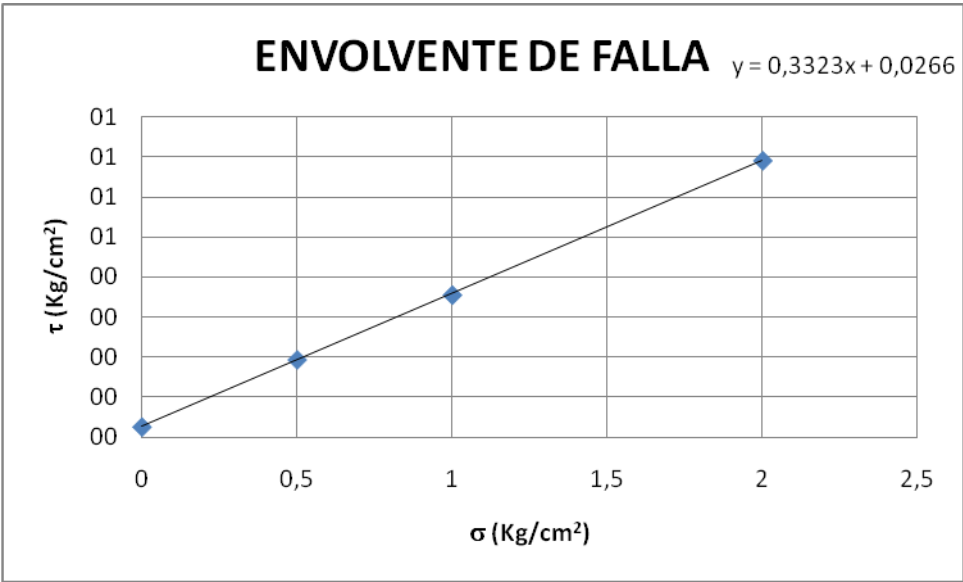
σ	
(Kg/cm ²)=	2

Vel (mm/min)=	1
σ_{max} (Kg/cm ²)=	0,69



Con la siguiente tabla se realizo la tabla para graciarse la envolvente de falla y conocer el valor de los terminos de cohesión y ángulo de fricción interna.

σ (Kg/cm ²)	σ_{max} (Kg/cm ²)	Humedad (%)	σ (g/cm ³)	σ_d (g/cm ³)
0,5	0,19	7,35	1,77	1,65
1	0,36	7,62	1,68	1,57
2	0,69	7,92	1,78	1,65



ϕ (°)=	18,38
c (Kg/cm ²)=	0,0266

Anexo G. Con respecto a la Permeabilidad de los suelos

En las tablas se presentan los calculos realizados para obtener la permeabilidad del suelo contaminado al 5% de hidrocarburo a los 15 dias.

H	162,26
DIAMETRO DE LA MUESTRA (cm)	6,34
ALTURA DE LA MUESTRA = L (cm)	2,48
AREA	31,57
HUMEDAD =	12,93%
DIAMETRO DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA BURETA (CM)	0,46
AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA BURETA (CM2) a=	0,17

ENSAYO No	h1 (cm)	h2 (cm)		t seg	T (C)
1	70	65,7	4,3	86400	24
1	70	66,4	3,6	86400	24
1	70	65,4	4,6	86400	24
1	70	67,6	2,4	86400	23,5
1	70	68,2	1,8	86400	24
PROMEDIO =	70	66,66	3,34	86400	23,9

$K_T = (a * L / A * t) * \ln(h_1/h_2)$	
$K_T =$	7,39E-09
$n_T / n_{20} =$	0,9097
$K_{20} =$	6,72E-09

Anexo H. Con respecto a la Consolidación unidimensional de los suelos

A continuación se presentan los cálculos correspondientes al ensayo de consolidación unidimensional, correspondiente a la muestra de suelo tipo (Sn).

Tabla de cálculos de Consolidación unidimensional, correspondiente a la muestra de suelo tipo (Sn).

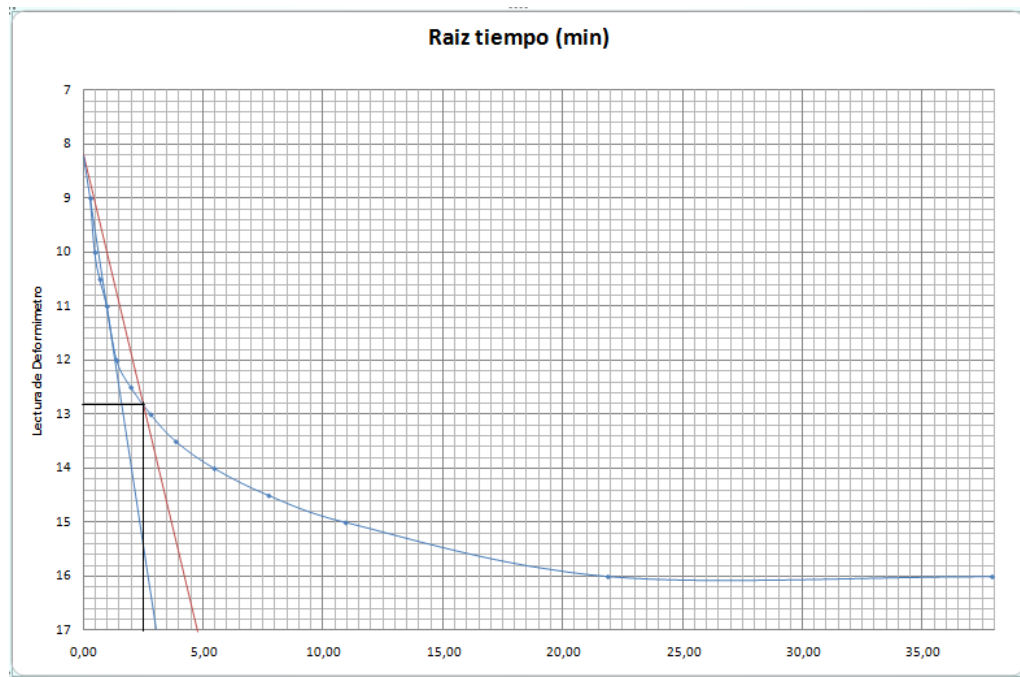
DATOS INICIALES		
ALTURA INICIAL $H_o =$	1,99	
DIAMETRO =	6,29	
AREA	31,07364414	CM2
Altura inicial del suelo, H_i	1,99	Cm
Gravedad específica del suelo G_s	3,15	
Altura de sólidos, $h_s =$	1,093766197	Cm
Altura inicial de vacios, $h_v =$	0,896233803	Cm
Grado de saturación inicial, $S_i =$	0,772372678	
Relación de Vacios inicial, $e_i =$	0,819401628	

DATOS DE HUMEDAD	
INICIAL	
Pm humedad + Anillo inicial =	195,65
Peso del Anillo =	67,08
Peso del suelo húmedo, $W_t =$	128,57
peso del suelo seco al horno, $W_s =$	107,06
FINAL	

DATOS DE HUMEDAD	
Pm humedad+ anillo	193,08
Pm seca+ anillo	174,14
P anillo	67,08
P suelo seco	107,06
HUMEDAD (%)	0,176910144

Carga 0,5

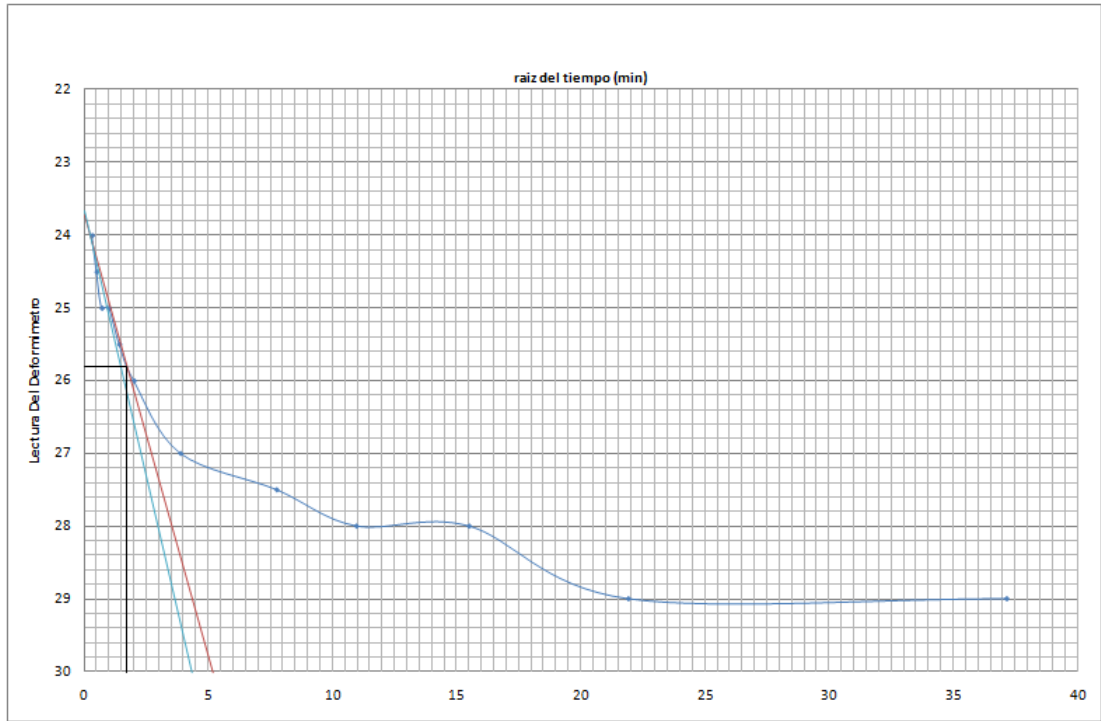
0,5 kg/cm ²		
tiempo (min)	raiz del tiempo (min)	deformimetro (10 ⁻³ pulgadas)
0	0,00	0
0,1	0,32	9
0,25	0,50	10
0,5	0,71	10,5
1	1,00	11
2	1,41	12
4	2,00	12,5
8	2,83	13
15	3,87	13,5
30	5,48	14
60	7,75	14,5
120	10,95	15
240	15,49	15
480	21,91	16
4820	69,43	16



Carga 0,5 kg/cm ²	t ₉₀	5,06
------------------------------	-----------------	------

Carga 1

1 kg/cm ²		
tiempo (min)	raiz del tiempo (min)	deformimetro (10 ⁻³ pulgadas)
0	0	16
0,1	0,32	24
0,25	0,5	24,5
0,5	0,71	25
2	1,41	25,5
4	2	26
15	3,87	27
60	7,75	27,5
120	10,95	28
480	21,91	29
1380	37,15	29

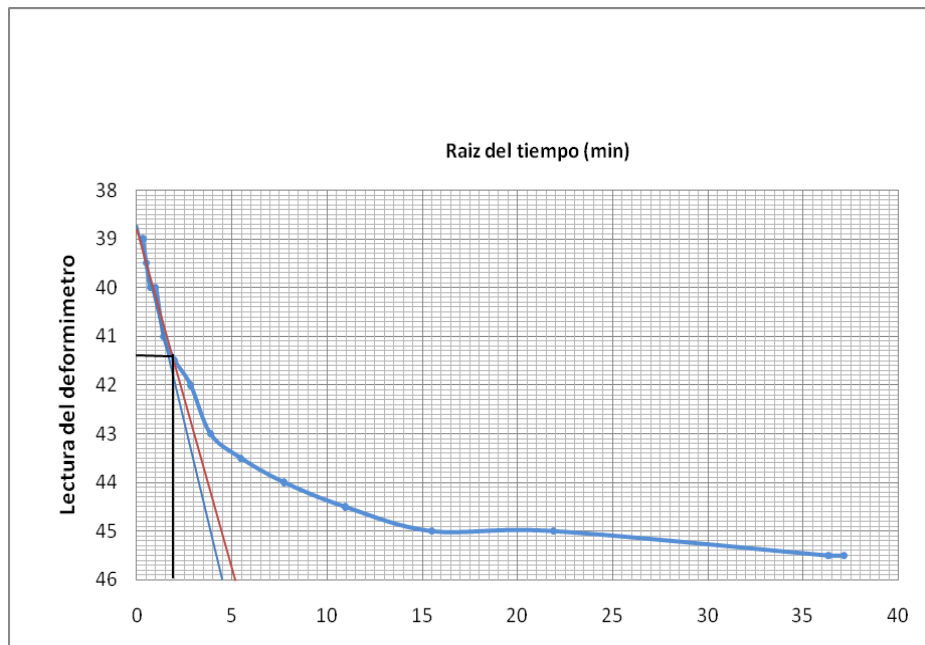


Carga 1 kg/cm2	t90	1.69
----------------	-----	------

Carga 2

2 kg/cm2		
tiempo (min)	Raiz del tiempo (min)	deformimetro (10 ⁻³ pulgadas)
0	0	29
0,1	0,32	39
0,25	0,50	39,5
0,5	0,71	40
1	1,00	40
2	1,41	41
4	2,00	41,5
8	2,83	42

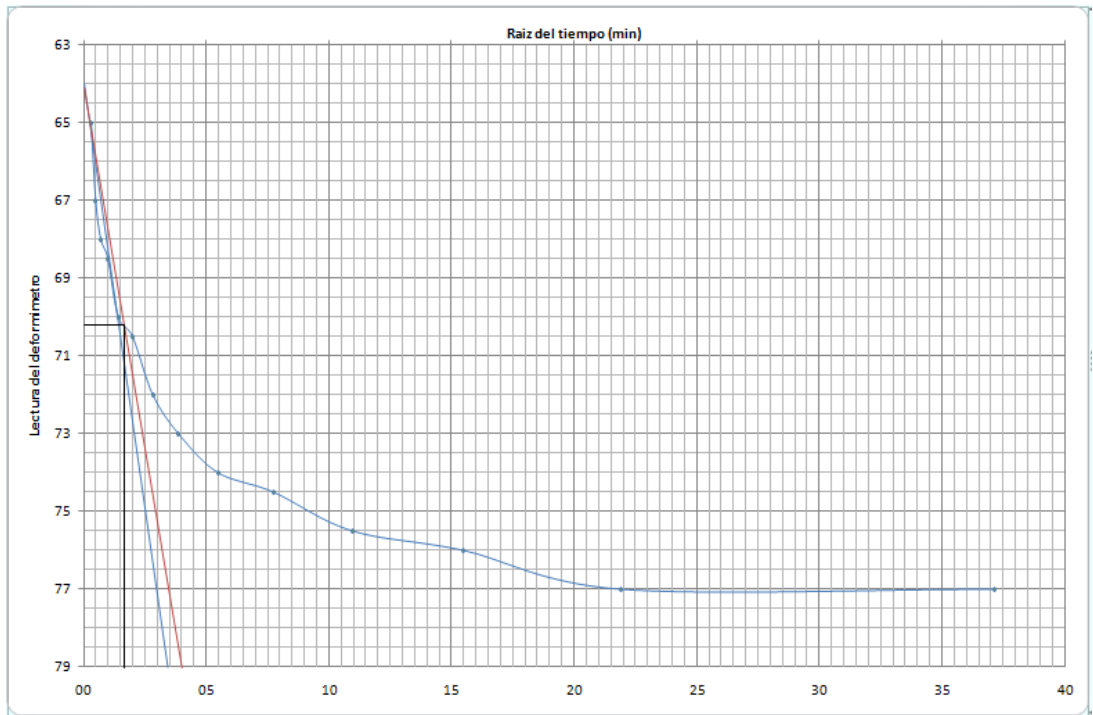
2 kg/cm ²		
tiempo (min)	Raiz del tiempo (min)	deformimetro (10 ⁻³ pulgadas)
15	3,87	43
30	5,48	43,5
60	7,75	44
120	10,95	44,5
240	15,49	45
480	21,91	45
1320	36,33	45,5
1380	37,15	45,5



Carga 2 kg/cm ²	t ₉₀	4
----------------------------	-----------------	---

Caga 4

4 kg/cm ²		
tiempo (min)	raiz del tiempo (min)	deformimetro (10 ⁻³ pulgadas)
0	0	45,5
0,1	0,3	65
0,25	0,5	67
0,5	0,7	68
1	1,0	68,5
2	1,4	70
4	2,0	70,5
8	2,8	72
15	3,9	73
30	5,5	74
60	7,7	74,5
120	11,0	75,5
240	15,5	76
480	21,9	77
1380	37,1	77



Carga 4 kg/cm ²	t ₉₀	2.56
----------------------------	-----------------	------

Tabla de datos para calculo de compresibilidad

CARGA (kPa)	Relación de vacios instantánea e	Coficiente de consolidación Cv (cm ² /min)
0	0,819	-----
50	0,782	0,087
100	0,752	0,026
200	0,714	0,030
400	0,641	0,035
200	0,645	
100	0,650	
50	0,652	
0	0,671	1,017

