

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS ORGÁNICOS AJUSTADOS  
AFECTADOS POR DERRAMES SUPERFICIALES DE CRUDO EN  
CONCENTRACIÓN POR PORCENTAJE EN PESO:  
5, 10, 15 y 30**

**GUILLEMO ALBERTO GALVIS HORMIGA  
CAMILO ANDRES MANTILLA DUEÑEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS ORGÁNICOS AJUSTADOS  
AFECTADOS POR DERRAMES SUPERFICIALES DE CRUDO EN  
CONCENTRACIÓN POR PORCENTAJE EN PESO:**

**5, 10, 15 y 30**

**GUILLERMO ALBERTO GALVIS HORMIGA  
CAMILO ANDRES MANTILLA DUEÑEZ**

**Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil**

**Asesor**

**Ph.D. MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2012**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

## **DEDICATORIAS**

Este estudio, producto de tanto esfuerzo, se lo dedico principalmente a Dios y le doy gracias por regalarme la vida, la salud y todas las capacidades necesarias para cumplir mis metas, entre ellas mi proyecto de grado.

A mis padres, por inculcarme el valor del estudio, por ser mi pilar y mi fuente de energía en las largas horas de trabajo, en donde con sus palabras siempre me brindaron apoyo y fuerza.

**Guillermo Alberto Galvis Hormiga**

## **DEDICATORIAS**

Dedico este trabajo a Dios, ser supremo, por permitirme vivir cada día de este proceso de aprendizaje.

Al esfuerzo incesante de mi madre ADRIANA DUEÑEZ, mujer invencible que cada día me demuestra que no hay nada imposible; que con sus consejos fortaleció mis principios morales logrando hacer de mí una persona transparente y dedicada.

A mis hermanas AURA y DANIELA MANTILLA agradezco la comprensión y el apoyo que me brindaron durante todo este tiempo, animándome a seguir adelante con mis metas y a cumplirlas de manera positiva.

A mis amigos y familiares por creer en mis capacidades y acompañarme en el desarrollo y continuación de los objetivos que me he propuesto.

**Camilo Andrés Mantilla Dueñez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Se siente una gran satisfacción al culminar una meta como ser Ingeniero Civil, propuesta varios años atrás, sobretodo cuando dicha meta se alcanza como producto del esfuerzo y la constancia de mucha gente; al decir mucha gente, me refiero a las personas que me brindaron su apoyo incondicional; ya que sin ellas no habría podido lograrlo. Personas como mis padres Guillermo y Esther, les doy infinitas gracias por que su amor y confianza se convirtió en mi motor.

Agradezco a mis hermanas Bibiana y Natalia su apoyo irrestricto, por preocuparse por mi bienestar y hacer todo lo posible por que contara con las herramientas necesarias para la realización del presente trabajo.

También agradezco a la Universidad Pontificia Bolivariana, a todos los profesores que hicieron parte de mi educación, y muy especialmente a la Doctora María Fernanda Serrano, mi Directora de Tesis, por su dedicación y su tiempo, por orientarme magistralmente hacia la consecución del objetivo, sin ella no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto.

**Guillermo Alberto Galvis Hormiga**

## **AGRADECIMIENTOS**

Es importante cumplir lo que nos proponemos, y es necesario poner todo nuestro empeño en cada cosa que deseamos realizar, sin rendirnos y pese a las dificultades que a muchos se nos presentan, debemos ser perseverantes y tener presente que Dios siempre nos va a acompañar, poniendo en nuestro camino a personas que nos van a brindar su ayuda, para que podamos lograr ese propósito que un día decidimos comenzar.

Le doy infinitas gracias a Dios por Sembrar en mí la paciencia necesaria para cumplir todo lo que me he propuesto obteniendo los resultados esperados.

Agradezco a mis padres ADRIANA DUEÑEZ Y ROSENDO MANTILLA por confiar en mis capacidades y por tener la voluntad de ayudarme en cada una de las etapas de este proceso, a mis familiares que estuvieron presentes en el inicio y la culminación de este propósito.

Agradezco igualmente a JUAN BAUTISTA MANTILLA porque me brindo su ayuda y me enseñó que siempre habrá una solución a los problemas. A ELIANA DANGOND por su comprensión y su interés en apoyarme.

A la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA por la oportunidad que me concedió, impulsando mi formación profesional y personal.

A la Dra. MARIA FERNANDA SERRANO por su contribución en la realización de este proyecto y sus aportes e ideas guiándome hacia la terminación exitosa de éste.

A la ING. LUZ MARINA TORRADO por permitirnos el uso de los espacios necesarios para la ejecución de esta investigación. A ELI RUEDA Y VICENTE PAEZ por su orientación y ayuda en cada una de las pruebas realizadas.

A mi compañero GUILLERMO ALBERTO GALVIS por sus ideas y aportes para este proyecto, teniendo la comprensión y paciencia necesarias para llevar a cabo todas las actividades que ayudaron a dar inicio y fin a todas las etapas de este proceso estando presente de forma activa en su realización y éxito.

**Camilo Andrés Mantilla Dueñez**

## CONTENIDO

	Pág.
1.INTRODUCCION	23
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.2 ALCANCE	26
1.3 JUSTIFICACIÓN	27
1.4 OBJETIVOS	28
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	28
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
1.5 RELEVANCIA DEL ESTUDIO	28
1.6 ORGANIZACIÓN	29
2. MARCO TEÓRICO	31
2.1 TEORÍA DE LOS SUELOS	31
2.1.1 Suelo	31
2.1.2 Origen de los suelos	32
2.1.3 Clasificación de los suelos	33
2.2 TEORÍA DE PRODUCCIÓN DE LOS HIDROCARBUROS	42
2.2.1 El petróleo	42
2.2.2 Exploración	42
2.2.3 Explotación	46
2.2.4 Transporte	48
2.2.5 Refinación	51
3. METODOLOGÍA	56
3.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	57
3.4 CONTAMINACIÓN DE LAS MUESTRAS	57
3.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO	59
3.6 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS	60

3.7 LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO DEL SUELO	62
3.8 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS	64
3.9 RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)	66
3.10 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS (CABEZA VARIABLE)	67
3.11 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE (MÉTODO DE CORTE DIRECTO)	69
3.12 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO EN SUELOS MEDIANTE PÉRDIDA POR IGNICIÓN	70
3.13 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS	71
3.14 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE COLORIMETRÍA	72
4. RESULTADOS	74
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS UTILIZADOS DURANTE EL ESTUDIO	74
4.2 SUELO SIN CONTAMINACIÓN (S0)	75
4.3 SUELO CONTAMINADO CON EL 5% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S1)	76
4.4 SUELO CONTAMINADO CON EL 5% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S2)	77
4.5 SUELO CONTAMINADO CON EL 10% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S3)	78
4.6 SUELO CONTAMINADO CON EL 10% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S4)	79
4.7 SUELO CONTAMINADO CON EL 15% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S5)	80
4.8 SUELO CONTAMINADO CON EL 15% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S6)	81
4.9 SUELO CONTAMINADO CON EL 30% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S7)	82
4.10 SUELO CONTAMINADO CON EL 30% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S8)	83
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	85
5.1 CON RESPECTO A LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS	85
5.1.1 Resultados a los 15 días de contaminado	85
5.1.2 Resultados a los 45 días de contaminado	86
5.1.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	88

5.2 CON RESPECTO AL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS	91
5.2.1 Resultados a los 15 días de contaminado	91
5.2.2 Resultados a los 45 días de contaminado	93
5.2.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	94
5.3 CON RESPECTO AL LÍMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS	98
5.3.1 Resultados a los 15 días de contaminado	98
5.3.2 Resultados a los 45 días de contaminado	100
5.3.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	102
5.4 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN	104
5.4.1 Resultados a los 15 días de contaminado	104
5.4.2 Resultados a los 45 días de contaminado	106
5.4.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	108
5.5 CON RESPECTO A LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS	111
5.5.1 Resultados a los 15 días de contaminado	111
5.5.2 Resultados a los 45 días de contaminado	113
5.5.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	115
5.6 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE	117
5.6.1 Resultados a los 15 días de contaminado	117
5.6.2 Resultados a los 45 días de contaminado	118
5.6.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	120
5.7 CON RESPECTO A LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS	124
5.7.1 Resultados a los 15 días de contaminado	124
5.7.2 Resultados a los 45 días de contaminado	127
5.7.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	130
5.8 CON RESPECTO AL ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN (PRÓCTOR MODIFICADO)	132
5.8.1 Resultados a los 15 días de contaminado	132

5.8.2 Resultados a los 45 días de contaminado	134
5.8.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación	135
5.9 CON RESPECTO AL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO	139
5.9.1 Resultado análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado (S0).	139
5.10 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO EN SUELOS MEDIANTE PÉRDIDA POR IGNICIÓN	141
5.11 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO EN SUELOS MEDIANTE COLORIMETRÍA	141
6. CONCLUSIONES	142
8. RECOMENDACIONES	148
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	149
ANEXOS	153

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Sistemas de clasificación de los suelos	33
Figura 2 clasificaciones de suelos USCS	34
Figura 3 Límites de Atterberg Carta de Plasticidad	38
Figura 4 Ecuación para establecer el índice de grupo	39
Figura 5 Nomenclatura Calcificación de suelos sistema AASHTO	40
Figura 6 Clasificación de suelos según sistema AASHTO	41
Figura 7. Perforación Exploratoria	43
Figura 8. Operadores efectuando trabajos de Sísmica.	45
Figura 9. Equipo de Explotación Árbol de navidad	46
Figura 10. Equipo de explotación Machín	47
Figura 11. Esquema del Transporte del crudo.	48
Figura 12. Oleoducto colombiano.	49
Figura 13. Tramo de Oleoducto en Colombia.	50
Figura 14. Tramo gasoducto	51
Figura 15. Proceso de Refinación del crudo	53
Figura 16. Sistema de Desfogue de una Refinería.	55
Figura 17 Proceso de contaminación del suelo	58
Figura 18 Proceso de tamizado	59
Figura 19 Muestra de la impermeabilidad adquirida por del suelo	61
Figura 20 Ensayo de Gravedad específica	62
Figura 21 Ensayo de límite líquido	63
Figura 22 Pastilla de suelo posterior al desplazamiento del mercurio	65
Figura 23 secado de la muestra de suelo	66
Figura 24 Ensayo de próctor modificado	67
Figura 25 Ensayo de permeabilidad de los suelos	69

Figura 26 Ensayo de corte directo	70
Figura 27 ensayo de consolidación	72
Figura 28 contenido de materia orgánica por colorimetría	73
Figura 29. Resultados Gravedad Específica de los suelos a los 15 días de contaminación.	86
Figura 30. Resultados Gravedad Específica de los suelos a los 45 días de contaminación.	87
Figura 31. Resultados Gravedad Específica de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	89
Figura 32. Resultados Límite líquido de los suelos a los 15 días de contaminación.	93
Figura 33. Resultados Límite líquido de los suelos a los 45 días de contaminación.	94
Figura 34. Resultados Límite líquido de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	96
Figura 35. Resultados Límite plástico de los suelos a los 15 días de contaminación.	100
Figura 36. Resultados Límite plástico de los suelos a los 45 días de contaminación.	101
Figura 37. Resultados Límite plástico de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	103
Figura 38. Resultados Límite de contracción de los suelos a los 15 días de contaminación.	106
Figura 39. Resultados Límite de contracción de los suelos a los 45 días de contaminación.	108
Figura 40. Resultados Límite de contracción de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	109
Figura 41. Resultados Permeabilidad de los suelos a los 15 días de contaminación.	113

Figura 42. Resultados Permeabilidad de los suelos a los 45 días de contaminación.	114
Figura 43. Resultados Permeabilidad de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	116
Figura 44. Resultados Resistencia al corte de los suelos a los 15 días de contaminación.	118
Figura 45. Resultados Resistencia al corte de los suelos a los 45 días de contaminación.	120
Figura 46. Resultados Resistencia al corte de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	122
Figura 47. Resultados Consolidación de los suelos a los 15 días de contaminación.	127
Figura 48. Resultados Consolidación de los suelos a los 45 días de contaminación	129
Figura 49. Resultados Consolidación de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	132
Figura 50. Resultados Compactación (Próctor) de los suelos a los 15 días de contaminación.	134
Figura 51. Resultados Compactación (Próctor) de los suelos a los 45 días de contaminación.	135
Figura 52. Resultados Compactación (Próctor) de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.	137
Figura 53 Resultado Análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado	139

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Denominaciones típicas de los grupos de suelos por medio del sistema unificado, teniendo en cuenta sus propiedades más importantes.	35
Tabla 2 Denominaciones típicas de los grupos de suelos por medio del sistema unificado, teniendo en cuenta su aptitud relativa para diversas aplicaciones.	36
Tabla 3 Notación de los tipos de muestras de suelo utilizados	74
Tabla 4 Resultados de los ensayos de caracterización del suelo sin contaminar	75
Tabla 5. Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 5% de crudo a los 15 días	76
Tabla 6 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 5% de crudo a los 45 días	78
Tabla 7 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 10% de crudo a los 15 días.	79
Tabla 8 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 10% de crudo a los 45 días	80
Tabla 9 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 15% de crudo a los 15 días.	81
Tabla 10 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 15% de crudo a los 45 días	82
Tabla 11 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 30% de crudo a los 15 días	83
Tabla 12 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 30% de crudo a los 45 días	84
Tabla 13 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo de 15 días	85

Tabla 14 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo de 45 días	87
Tabla 15 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	88
Tabla 16 Valores tipicos de Gravedad Especifica	91
Tabla 17 porcentajes de Variación de los resultados del Límite líquido partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	92
Tabla 19 porcentajes de Variación de los resultados del Límite líquido partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	95
Tabla 20 Valores del índice de plasticidad de las muestras de suelo	97
Tabla 21 Clasificación de los suelos por medio de la carta de plasticidad	98
Tabla 22 porcentajes de Variación de los resultados del Límite Plástico partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	99
Tabla 23 porcentajes de Variación de los resultados del Límite Plástico partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días	100
Tabla 24 Porcentajes de Variación de los resultados del Límite plástico partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	102
Tabla 25 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	105
Tabla 26 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días	106
Tabla 27 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	108
Tabla 28 Resultados de precisión de los factores de contracción	111
Tabla 29 porcentajes de Variación de los resultados en permeabilidad partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	112
Tabla 30 porcentajes de Variación de los resultados en permeabilidad partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días	113
Tabla 31 porcentajes de Variación de los resultados en permeabilidad partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	115

Tabla 32 Porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	117
Tabla 33 porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días	119
Tabla 34 porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	120
Tabla 35 Valores típicos de ángulos de fricción	123
Tabla 36 porcentajes de Variación de los resultados de consolidación unidimensional partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	125
Tabla 37 Porcentajes de Variación de los resultados de consolidación unidimensional partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días	128
Tabla 38 porcentajes de Variación de los resultados de consolidación unidimensional partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	130
Tabla 39 porcentajes de Variación del ensayo modificado de compactación, partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días	133
Tabla 40 porcentajes de Variación del ensayo modificado de compactación, partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días	134
Tabla 41 porcentajes de Variación del ensayo modificado de compactación, partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días	136
Tabla 42 valores típicos de humedad óptima de los suelos	138
Tabla 43 Resultado de análisis granulométrico por tamices	140

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Con respecto a la Gravedad Específica de los suelos	153
ANEXO B. Con respecto a la Determinación Límite líquido de los suelos	155
ANEXO C. Con respecto a la Determinación del Límite plástico de los suelos	157
ANEXO D. Con respecto a la Determinación de los factores de contracción	158
ANEXO E. Con respecto a la Permeabilidad de los suelos	160
ANEXO F. Con respecto a la Determinación de la resistencia al corte	162
ANEXO G. Con respecto a la Consolidación unidimensional de los suelos	170
ANEXO H. Con respecto al Ensayo modificado de compactación	191

## **RESUMEN**

**TITULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE SUELOS ORGÁNICOS AJUSTADOS AFECTADOS POR DERRAMES SUPERFICIALES DE CRUDO EN CONCENTRACIÓN POR PORCENTAJE EN PESO: 5, 10, 15 y 30**

**AUTORES:** GUILLERMO ALBERTO GALVIS HORMIGA  
CAMILO ANDRÉS MANTILLA DUEÑEZ

**FACULTAD:** INGENIERÍA CIVIL

**DIRECTOR:** MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

**PALABRAS CLAVES:** caracterización mecánica, suelos, contaminación, crudo.

### **Contenido**

Todos los procesos de extracción de minerales en la tierra implican un riesgo para los ecosistemas terrestres y marinos, presentando así un peligro latente para el suelo. El proceso de extracción de petróleo y minerales requiere el uso de equipos pesados, disponer de una buena planeación y contar con trabajadores capacitados para lograr el éxito, acompañado de seguridad en los procesos; sin embargo esto no se presenta en muchos casos, ocasionando catástrofes ambientales como las ocurridas cuando se presentan los derrames de crudo.

Durante el presente trabajo se desarrolló una metodología con la cual se compararon los cambios en las propiedades mecánicas de suelos tipo orgánico afectados por derrame de crudo. En el estudio, se trabajó con las normas del Instituto Nacional de Vías (INV E). Para la selección del suelo, éste fue ajustado partiendo de una composición de 60% abono orgánico y 40% suelo SC (arena arcillosa). Posteriormente, la muestra de suelo se mezcló con crudo suministrado

por Ecopetrol en febrero del 2011. Se realizó la contaminación con unas concentraciones por porcentaje en peso de 5, 10, 15 y 30. Finalmente se realizaron los ensayos a los 15 y 45 días posteriores a la contaminación en cada uno de los cuatro casos.

El ajuste del material se realizó para facilitar las condiciones experimentales, debido a que en el mercado no es tan común encontrar una capa de suelo uniforme de naturaleza orgánica.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas del suelo orgánico, muestran variaciones. Estos cambios no solo se deben a los diferentes porcentajes de contaminación con crudo, si no también a los tiempos de exposición a la contaminación.

## **ABSTRACT**

**TITLE: MECHANICAL CHARACTERIZATION OF ORGANIC SOILS AFFECTED BY SUPERFICIAL CRUDE OIL SPILLS IN WEIGHT PERCENT CONCENTRATION: 5, 10, 15 AND 30**

**AUTHORS:** GUILLERMO ALBERTO GALVIS HORMIGA  
CAMILO ANDRÉS MANTILLA DUEÑEZ

**FACULTY:** CIVIL ENGINEERING

**DIRECTOR:** MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

**KEY WORDS:** mechanical characterization, soils, pollution, crude oil.

### **Content**

All the mineral extraction processes from soil imply a risk to terrestrial and marine ecosystems, representing a latent danger to soils. The petroleum and mineral extraction process requires the use of heavy equipment, having a good planning and the availability of skilled workers to get success, involving security in the processes. However, this does not always occur, which gives rise to environmental catastrophes like crude oil spills.

This work has been developed with a methodology in which the changes in the mechanical properties of organic soils affected by crude oil spill were compared. In the study the rules of the Instituto Nacional de Vias (INV E) were taken into account. The selection of the soil was adjusted taking a composition of 60% organic fertilizer and 40% soil SC (clayey sand) as a starting point. Afterwards, the soil sample was mixed with crude oil supplied by Ecopetrol in February 2011. The pollution was made in weight percent concentrations of 5, 10, 15 and 30. Finally, the trials were made 15 and 45 days after the pollution in each of the four cases.

The adjustment of the material was carried out to make it easier the experimental conditions, due to the fact that it is unusual to find organic even soil layers in the market.

The results obtained from the different tests made in order to characterize the mechanical properties of organic soils show variations. These changes are due not only to the different percentages of crude oil pollution, but also to the time of exposition to the pollution.

## 1. INTRODUCCION

Desde el periodo neolítico el suelo se constituyó como el material mas abundante del mundo para la construcción y se utilizó en monumentos, tumbas, vías de comunicación y estructuras para la retención de agua. [4]. Posteriormente, hacia mediados del siglo XIII con la revolución industrial, aún no se tenía conciencia ecológica para la conservación del medio ambiente, hoy, muchos años después, hablar de la llamada ola verde es cada vez más común.

Debido al progreso de las culturas se ha venido poblando el planeta, lo cual se evidencia con la tasa de natalidad en aumento, lo que motiva a la expansión de terrenos y al desarrollo de la infraestructura para facilitar la vida en comunidad. Adicionalmente, la sociedad moderna y el estilo de vida demandan grandes consumos de energía para el mantenimiento de las ciudades y desarrollo de las mismas.

Una de las principales fuentes de energía se encuentra en los combustibles fósiles, los cuales cuentan con una gran infraestructura de explotación y transporte, que tiene diversos medios de distribución dependiendo del tipo de zona (tierra o mar), siendo el más común el oleoducto. En la actualidad, los oleoductos pueden atravesar cultivos, bosques y fuentes de agua, representando una amenaza constante, ya que pueden presentarse derrames por falta de mantenimiento y fallas técnicas, y en otros casos por atentados terroristas afectando directamente el suelo.

El derrame de hidrocarburos es una de las mayores afectaciones que ha generado el ser humano sobre los ecosistemas del planeta, y por ende sobre los suelos, provocando así exorbitantes inversiones a la hora de realizar procedimientos de remediación y limpieza.

En Colombia son escasos los estudios relacionados con la afectación en las variaciones mecánicas que los hidrocarburos u otros contaminantes pueden ocasionar; por ello, el origen de este proyecto se enfocó, en analizar los cambios observados en el suelo con diferentes grados de contaminación, estudiando las variaciones a los 15 y 45 días de ocurrido el derrame.

En el presente estudio, se logró caracterizar las propiedades mecánicas de los suelos orgánicos tanto de la muestra no contaminada, como las muestras contaminadas con crudo en los diferentes porcentajes.

El proyecto se encuentra dividido por capítulos los cuales se encuentran conformados de la siguiente manera: El primer capítulo cuenta con la introducción, justificación, planteamiento del problema, alcance, objetivos y relevancia del estudio.

El segundo capítulo muestra los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo, haciendo énfasis en los suelos y los hidrocarburos. Posteriormente el capítulo tercero cuenta con la metodología que se utilizó en el desarrollo del proyecto, los procedimientos de los diferentes ensayos realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad; más adelante, en el cuarto capítulo, se incluyen los resultados cuantitativos obtenidos a lo largo del estudio.

El quinto capítulo presenta el análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

Posteriormente el sexto capítulo presenta con las conclusiones pertinentes a cada uno de los ensayos realizados, más adelante el capítulo séptimo contiene recomendaciones útiles para el desarrollo de proyectos similares, y por último el capítulo noveno incluye los anexos correspondientes a los cálculos realizados en cada ensayo (un cálculo tipo de cada ensayo).

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El derrame de hidrocarburos, su inadecuado manejo y mala disposición de los mismos tiene consecuencias variadas, siendo la contaminación de los suelos y aguas subterráneas las más comunes.

Cuando un terreno se contamina por derrame de hidrocarburo, en algunos casos bajo el manto superficial del suelo se encuentran aguas subterráneas, las cuales pueden verse afectadas y expandirse el daño a ríos y quebradas. Al menos en tres grandes ciudades de América latina como: Lima, la Habana y México DF, las aguas subterráneas suministran la mayor parte del abastecimiento municipal, debido a su bajo costo y excelente calidad, también son la mayor fuente de riego rural en países como Costa Rica proveyendo más del 90%. [1], de modo que en estos casos, la calidad del agua se vería afectada en el evento de ocurrencia de un derrame.

Hacia comienzos de 1980 se empezó a actuar sobre los terrenos contaminados. El método consistía en transportar los residuos contaminados a un vertedero y posteriormente revestirlos con una capa impermeable confinándolos. Más tarde se vió la necesidad de encontrar una solución permanente con un menor costo. En la actualidad, este tema es de suma importancia por las consecuencias sociales y económicas que representa para los países. [2]

En los últimos años los sectores industriales se han expandido y sofisticado rápidamente, así mismo generan residuos tóxicos mucho más complejos y en mayor cantidad. La industria petrolera no es ajena a este fenómeno convirtiéndose en un riesgo cada vez mayor para el suelo. [2]. Es así como, terrenos agrícolas, por ejemplo, se ven en peligro de contaminación con crudo, debido a los oleoductos que atraviesan diferentes sembradíos. Si se presentara

un derrame, en estos casos repercutiría directamente en la salud humana como consecuencia de la ingesta de alimentos contaminados por efectos residuales.

Es responsabilidad de los gobiernos, junto con las autoridades ambientales desarrollar elementos de protección al medio ambiente, que mitiguen la problemática de contaminación con hidrocarburos tanto en tierra como agua; también, en las instituciones educativas crear en los jóvenes y niños una conciencia ambiental por la conservación del medio para las generaciones futuras.

## **1.2. ALCANCE**

El presente estudio se centró en comparar las variaciones en las propiedades mecánicas de un suelo orgánico contaminado por un derrame de hidrocarburo. Debido a que en el mercado no es tan común encontrar una capa de suelo uniforme de naturaleza orgánica se decidió por conveniencia adaptar el suelo. Por lo tanto, para facilitar las condiciones experimentales, el suelo orgánico se ajustó como producto de la mezcla de un suelo caracterizado SC en proporción 40% y 60% de abono orgánico.

Se implementaron una serie de ensayos basados en las normas INV E, el suelo fue contaminado en concentración por porcentaje en peso de crudo de: 5, 10,15 y 30, ensayados a los (15) y (45) días. Este estudio sirve como base para trabajos que se encuentren direccionados a la remediación de suelos contaminados con crudo.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

El sector de hidrocarburos y minero han presentado gran avance en los últimos años, creando un ámbito de desarrollo a nivel de explotaciones y exportaciones. Según la revista Dinero la producción de petróleo aumentó un 16.9% en el 2010, pasando a 785.000 barriles diarios con respecto a 671.000 barriles producidos en 2009, datos que son suministrados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) [3]. Estas situaciones crean alerta tanto en el campo de la industria como en la sociedad Colombiana debido al impacto ambiental que esto genera al suelo.

El deterioro de los recursos naturales y las consecuencias que actualmente se están provocando en el mundo exigen un alto nivel de conciencia ambiental, por tal razón se debe optimizar los recursos, generar un uso adecuado y reutilizar lo desechado.

El suelo como recurso primario de toda obra de infraestructura, al ser contaminado por hidrocarburos ocasiona la urgencia del análisis de sus propiedades mecánicas para así empezar un proceso de restauración. El suelo como factor esencial de la vida y del desarrollo industrial requiere del estudio de sus propiedades para asignar nuevos usos y crear una visión en la reutilización de recursos que fueron desechados en los momentos de explotación y transporte de hidrocarburos.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General**

- Evaluar las propiedades mecánicas de suelo orgánico ajustado y contaminado por derrames superficiales de hidrocarburos para verificar los cambios en dichas propiedades que puedan generar modificaciones en el uso del suelo.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar las propiedades mecánicas de suelos orgánicos no contaminados
- Caracterizar las propiedades mecánicas de suelos orgánicos contaminados con crudo proveniente de estación petrolera en concentración porcentaje por peso de 5, 10, 15 y 30.
- Comparar las variaciones presentadas en las propiedades mecánicas.

## **1.5. RELEVANCIA DEL ESTUDIO**

Se pretende destacar la importancia de la caracterización mecánica de los suelos de naturaleza orgánica, que han sido contaminados con hidrocarburos, en este caso crudo suministrado por Ecopetrol. De esta forma, se identificaron las variaciones que sufre el suelo después de un derrame con el paso del tiempo y diferentes concentraciones de crudo.

Los resultados parciales de este trabajo serán socializados en el XI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y IV Congreso Colombiano de Hidrogeología con una ponencia titulada *Efecto del aceite en las propiedades mecánicas de suelos orgánicos afectados por derrame de crudo*. Así mismo, asociado a este estudio se construyó un prototipo de acuífero, con el cual se dejó al servicio de la comunidad académica un laboratorio a escala bidimensional para que de manera visual quienes se interesen por la interacción suelo-agua hagan de este acuífero una herramienta útil de aprendizaje. El desarrollo del acuífero, también se socializarán en el mismo encuentro con la ponencia *Modelo bidimensional de un acuífero: Estrategia pedagógica útil para la enseñanza de hidráulica e hidrología subterránea*. Adicionalmente, este trabajo hace parte de la investigación adelantada por el Grupo en Detección de Contaminantes y Remediación bajo la dirección de la Dra. María Fernanda Serrano Guzmán y codirección del Dr. Diego D. Pérez Ruiz, de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

## **1.6. ORGANIZACIÓN**

El presente trabajo se encuentra organizado por capítulos de la siguiente forma: El primer capítulo cuenta con la introducción, justificación, planteamiento del problema, alcance, objetivos y relevancia del estudio.

El segundo capítulo muestra los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del trabajo, haciendo énfasis en los suelos y los hidrocarburos. Posteriormente el capítulo tercero cuenta con la metodología que se utilizó en el desarrollo del proyecto, los procedimientos de los diferentes ensayos realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad; más adelante, en el cuarto capítulo, se incluyen los resultados cuantitativos obtenidos a lo largo del estudio.

El quinto capítulo presenta el análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

Posteriormente el sexto capítulo cuenta con las conclusiones pertinentes a cada uno de los ensayos realizados, más adelante el capítulo séptimo contiene recomendaciones útiles para el desarrollo de proyectos similares y por último el capítulo noveno incluye los anexos correspondientes a los cálculos realizados en cada ensayo (un cálculo tipo de cada ensayo).

## 2. MARCO TEÓRICO

El suelo es el material de construcción más abundante en nuestro planeta, y en muchas zonas se constituye como el único material disponible. Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción, debe seleccionar el tipo adecuado y el uso para el cual estaba previsto; es así como una masa de suelo instalada por el hombre recibe el nombre de relleno y el punto de extracción de donde fue tomada se denomina préstamo. [4]. En general en todo proyecto de infraestructura se ve necesaria la participación del suelo, estableciéndose como base fundamental en cualquier proyecto.

### 2.1 TEORÍA DE LOS SUELOS

**2.1.1 Suelo.** El suelo puede definirse de muchas maneras, dependiendo del punto de aplicación que se le dé. En ingeniería civil, suelo es todo el material que cubre la roca de la corteza terrestre o acumulación de las partículas sólidas provenientes de la desintegración física y la descomposición química de las rocas. [5;6]

El suelo también puede definirse como una “delgada capa presente sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteraciones físicas y/o químicas de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ellas se asientan” [7].

El agrónomo –según G.P Tschebotarioff-- define el suelo como la delgada parte superior del manto de rocas en el que penetran las raíces de las plantas y estas toman el agua y las demás sustancias necesarias para su existencia. [7]. A continuación se presentaran los diferentes tipos de suelos.

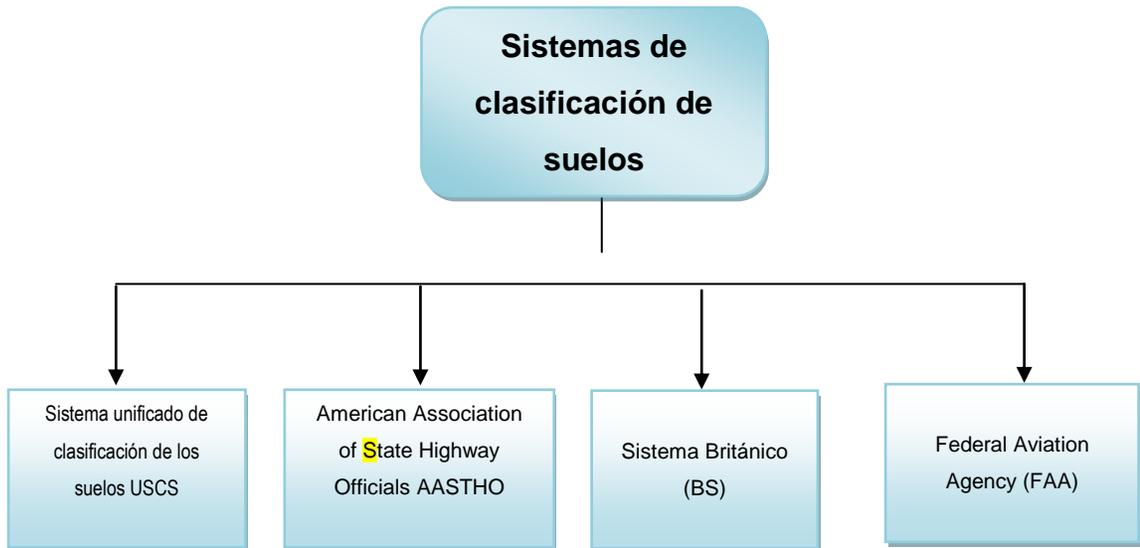
**2.1.2 Origen de los suelos.** Los suelos se forman dentro de nuestro planeta debido a las enormes fuerzas naturales que operan sobre la superficie de la tierra [5]. Estas fuerzas originan separación entre las partes de la roca, es decir la roca cada vez se fragmenta en partes más pequeñas, sin embargo éstas conservan las propiedades químicas de los minerales, de los cual se encuentra compuesta la roca [6].

Existen fuerzas de diferentes orígenes, las cuales son causantes de las desintegraciones de la roca como:

- Fuerzas de origen interno, son producidas por los cambios abruptos de temperatura, generando dilatación y contracción desigual en las distintas partes de la roca, lo cual crea presiones que dan lugar al interperismo esferoidal, el cual se caracteriza por desprendimientos de lajas curvas en las rocas llamadas exfoliación y también por expansiones producidas por la reducción de las presiones confinantes las cuales al ser liberadas generan líneas de fractura delimitando las lajas que posteriormente se desprenderán. [6]
- Acción de cuña, en las rocas que presentan grietas y poros, se alojan ciertos tipos de materiales, los cuales tratan de dilatarse, como en el caso del agua, la cual al congelarse aumenta su volumen aproximadamente en un 10%. El crecimiento de algunas plantas y la acción de cristales en el agua infiltrada dentro de la roca también producen la acción de cuña. [6]
- Fuerzas de origen externo, producto del agua, el viento y las partículas de las mismas rocas, produciendo abrasión y erosión. Algunos ejemplos de fuerzas de abrasión como el impacto de las olas contra las rocas y arenas arrastradas por el viento. [6]

**2.1.3 Clasificación de los suelos.** Los suelos pueden catalogarse por medio de diferentes sistemas de clasificación. Los principales, incluidos en la Figura 1, son:

**Figura 1 Sistemas de clasificación de los suelos**



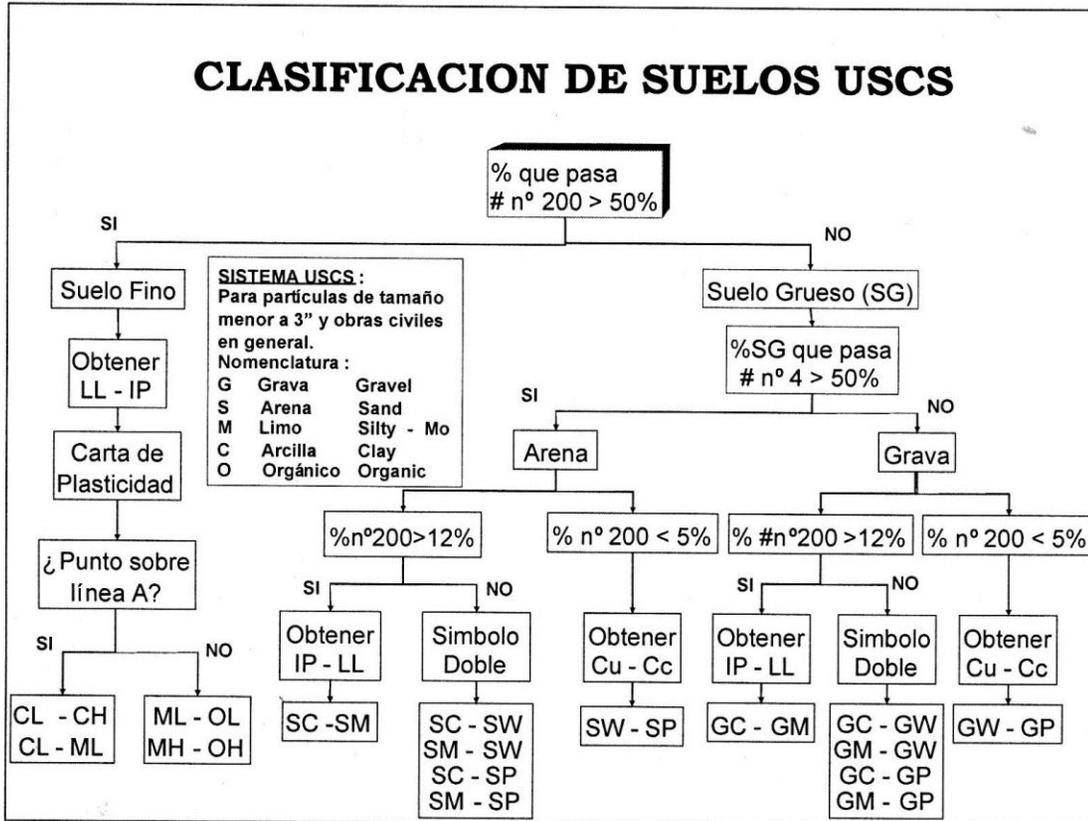
En el presente estudio se mencionan los dos primeros sistemas: Sistema unificado de clasificación de los suelos USCS y American Association of State Highway Officials AASTHO, ya que se consideraron como los de mayor relevancia y masificación en su uso.

**2.1.3.1 El sistema de clasificación unificado (USCS).** Unified Soil Classification System, se basa en la determinación de ensayos de laboratorio de granulometría del suelo, límite líquido e índice de plasticidad. Los elementos más importantes de este sistema de clasificación en un principio fueron propuestos por Arturo Casagrande, en el años de (1942) y adoptados más tarde por los ingenieros de los Estados Unidos para la construcción principalmente de aeropuertos [6].

Paso seguido de la obtención de los datos anteriormente nombrados, el sistema remite al cuadro de clasificación de los suelos USCS, en el cual se encuentran los diferentes tipos de suelo y sus respectivas Siglas (Figura 2). En las Tablas 1 y 2 se observa la descripción de los tipos de suelo según el USCS.

Figura 2 clasificaciones de suelos USCS

Clasificación de los suelos USCS



Fuente [8]

**Tabla 1 Denominaciones típicas de los grupos de suelos por medio del sistema unificado, teniendo en cuenta sus propiedades más importantes.**

Denominaciones típicas de los de los grupos de suelos.	Símbolo del grupo	PROPIEDADES MAS IMPORTANTES				Facilidad de tratamiento en obra.
		Permeabilidad en estado compactado	Resistencia al corte en estado compacto y saturado excelente	Compresibilidad en estado compacto y saturado.		
Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arenas con pocos finos o sin ellos.	G W	Permeable	Excelente	Despresiable	Excelente	
Gravas mal graduadas, mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos.	G P	Muy permeable	Buena	Despresiable	Buena	
Gravas limosas mal graduadas mezclas de gravas, arena y limo.	G M	Semipermeable a impermeable.	Buena	Despresiable	Buena	
Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de gravas, arena y arcilla.	G S	Impermeable	Buena a regular	Muy baja	Buena	
Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.	S W	Permeable	Excelente	Despreciable	Excelente	
Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.	S P	Permeable	Buena	Muy baja	Regular	
Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas.	S M	Semipermeable a impermeable.	Buena	Baja	Regular	
Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla mal graduadas.	SC	Impermeable	Buena a regular	Baja	Buena	
Limos inorgánicos y arenas muy finas polvo de roca, arenas finas arcillosas o limosas con ligera plasticidad	ML	Semipermeable a impermeable.	Regular	Media	Regular	
Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras	CL	Impermeable	Regular	Media	Buena a Regular	
Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	OL	Semipermeable a impermeable.	Deficiente	Media	Regular	
Limos inorgánicos, suelos finos arenosos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos	MH	Semipermeable a impermeable.	Regular a deficiente	elevada	Deficiente	
Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad, arcillas grasas	CH	Impermeable	Deficiente	elevada	Deficiente	
Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta	OH	Impermeable	Deficiente	elevada	Deficiente	
Turba y otros suelos inorgánicos	Pt	-	-	-	-	

Fuente [8]

**Tabla 2 Denominaciones típicas de los grupos de suelos por medio del sistema unificado, teniendo en cuenta su aptitud relativa para diversas aplicaciones.**

Denominaciones típicas de los grupos de suelos.	APTITUD RELATIVA PARA DIVERSAS APLICACIONES									
	PRESAS DE TIERRA			CANALES		CIMENTACIONES		CARRETERAS		
	Homo- Geneas	Nucleo	Mantos o Espal- dones	Resis- tencia a la erosión	Revesti- miento tierra compactada	Con flujo de agua impor- tante	Con flujo de agua despre- ciable	Terraplenes		Capas de pavimento tienen grava
								Posibilidad de ex- pansion por helada		
		No	Si							
Gravas bien graduadas,mezclas de grava y arenas con pocos finos o sin ellos.	-	-	1	1	-	-	1	1	1	3
Gravas mal graduadas,mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos.	-	-	2	2	-	-	3	3	3	-
Gravas limosas mal graduadas mezclas de gravas,arena y limo.	2	4	-	4	4	1	4	4	9	5
Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de gravas,arena y arcilla.	1	1	-	3	1	2	6	5	5	1
Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.	-	-	3 si tienen grava 4	6 7	-	-	2	2	2	4
Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos.	-	-	si tienen grava 4	si tienen grava 8	-	-	5	6	4	-
Arenas limosas,mezclas de arena y limo mal graduadas.	4	5	-	si tienen grava 8	erosión critica 5	3	7	8	10	6
Arenas arcillosas,mezclas de arena y arcilla mal graduadas.	3	2	-	5	2 6	4	8	7	6	2
Limos inorgánicos y arenas muy finas polvo de roca, arenas finas arcillosas o limosas con ligera plasticidad	6	6	-	-	erosión critica 6	6	9	10	11	-
Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras	5	3	-	9	3 7	5	10	9	7	7
Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	8	8	-	-	erosión critica 8	7	11	11	12	-
Limos inorgánicos, suelos finos arenosos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos	9	9	-	-	- 8	8	12	12	13	-
Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad, arcillas grasas	7	7	-	10	cambio critico volumen 7	9	13	13	8	-
Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta	10	10	-	-	- 7	10	14	14	14	-
Turba y otros suelos inorgánicos	-	-	-	-	- 7	-	-	-	-	-

Fuente [8]

- Grava (G).** Se caracterizan por ser acumulaciones de los fragmentos de rocas los cuales presentan más de dos milímetros de diámetro. Cuando son arrastradas por el agua, las gravas sufren desgaste en sus bordes o aristas por lo cual su forma es redondeada. Como material suelto es común encontrarla en los lechos, en las márgenes de los ríos, también en algunos terrenos que han sido rellenados por causa del acarreo de los ríos y diversos otros lugares en los cuales las gravas han sido transportadas. Las gravas ocupan grandes extensiones pero en general se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Los tamaños de sus partículas varían entre 7.62 cm (3") y 2.0 mm. [7]

- **Arena (S).** Nombre perteneciente a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre el tamiz No. 4 y 0.074 mm. De diámetro, estas medidas incluyen partículas que pasan el tamiz No.4 y son retenidas por el 200 [5;7]

El origen y existencia de las arenas es análoga al de las gravas, las dos suelen encontrarse juntas en el mismo sitio. La arena de río es la que mas comúnmente contiene grandes proporciones de grava y arcilla. Las arenas al estar limpias no se contraen ya que carecen de plasticidad y si se aplica una carga en la superficie se comprimen casi de manera instantánea [7].

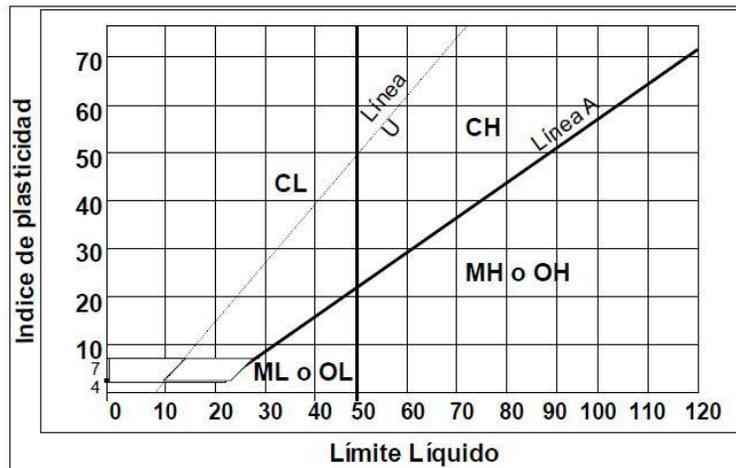
- **Limo (M).** Los limos se constituyen como suelos de granos finos que carecen de plasticidad, se clasifican en dos principales grupos, limos inorgánicos como los producidos en canteras, y limos orgánicos como el que se extrae de los ríos. Siendo este último de los casos de propiedades plásticas. el tamaño del limo se determina por el material que pase el tamiz número 200 y que posea poca o ninguna cohesión cuando se encuentra seco. Los limos sueltos y saturados son completamente inconvenientes para soportar cargas por medio de la instalación de zapatas. Su color comprende una variación desde el gris claro hasta el muy oscuro, su permeabilidad se considera muy baja y su compresibilidad alta [5; 7].
- **Arcilla (c).** Recibe el nombre de arcilla la partícula sólida cuyo diámetro sea menor de 0.005 mm y cuya masa cuente con la propiedad de convertirse en plástica en el momento de ser mezclada con agua. Desde el punto de vista químico se constituye como un silicato de alúmina hidratado, la estructura de estos materiales por lo general es cristalina y complicada, y sus átomos se encuentran en forma laminar. Dependiendo de la cantidad de sus granos gruesos las arcillas varían desde arcilla magra (de baja plasticidad) hasta las arcillas grasas (con alta plasticidad) [5; 7].

- **Materia orgánica (O).** La materia orgánica presente en los suelos en su gran mayoría se encuentra compuesta por vegetación descompuesta como la hulla. Suelos tales como los limos y arcillas orgánicas presentan diferentes cantidades de material vegetal finamente dividido, todos los suelos orgánicos de turba y los inorgánicos plásticos debido a su alta compresibilidad baja resistencia no se utilizan nunca como material para obras de ingeniería [5].

En general los anteriormente nombrados constituyen los principales tipos de suelos con los nombres más comúnmente utilizados por el ingeniero civil.

El sistema unificado cuenta con la carta de plasticidad; en la cual, entrando a ella con el índice de plasticidad y el límite líquido, es posible ubicar un punto por medio del cual, según su lugar se determina el tipo de suelo.

**Figura 3 Límites de Atterberg Carta de Plasticidad**



Línea A =  $0,73 ( LL - 20 )$   
 Línea U =  $0,90 ( LL - 8 )$

Fuente [8]

Dentro de los Estados Unidos este sistema es bastante utilizado en organizaciones como el cuerpo de ingenieros, la oficina de reclamos y algunas modificaciones menores por parte de las firmas constructoras [6].

**2.1.3.2. El sistema de clasificación de suelos AASHTO American Association of State Highway Officials.** El método de clasificación de suelos AASHTO utiliza los límites plásticos y líquido para conseguir una clasificación de dichos suelos entre los grupos A-4 y A-7, para los cuales por el hecho de contener más del 35% del material fino en el tamiz número 200 se considera como un factor fundamental de clasificación (Figura 4 y Figura 5).

Figura 4 Ecuación para establecer el índice de grupo

**FORMULA DEL IG**



## CLASIFICACION DE SUELOS

### Sistema AASHTO



**SISTEMA AASHTO** : Se basa en determinaciones de laboratorio de Granulometría, Límite, Líquido e Índice de Plasticidad.  
 Es un método realizado principalmente para Obras Viales.  
 Restricción para los finos: %malla n° 200 > 35% => Fino  
 La evaluación se complementa mediante el IG :

Ed.1973  $IG = 0,2 a + 0,005 ac + 0,01 bd$

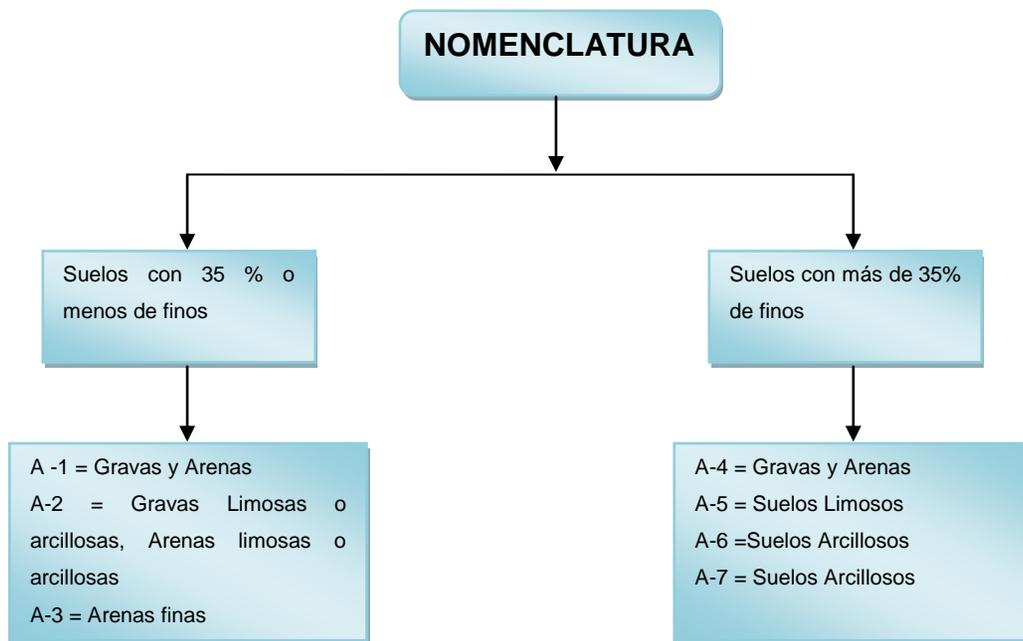
IG máx = 20	Máximo	Mínimo
a = % que pasa n° 200 ( 35 - 75 )		40      0
b = % que pasa n° 200 ( 15 - 55 )		40      0
c = % LL ( 40 - 60 )	20	0
d = % IP ( 10 - 30 )	20	0

ASTM D 3282 - 73 (78)

Ed.1978  $IG = ( F - 35 ) ( 0,2 + 0,005 ( LL - 40 ) ) + 0,01 ( F - 15 ) ( IP - 10 )$   
 IG puede ser > 20

Fuente [8]

Figura 5 Nomenclatura Calcificación de suelos sistema AASHTO



De igual forma, este factor puede manejarse para tener la clasificación de subgrupos de los suelos titulados A2, en los cuales tener menos del 35% del material más fino que el tamiz número 200 es un factor bastante relevante [9].

La clasificación de los subgrupos dentro del grupo A-2 se obtiene por medio de la determinación de si el suelo es A-2 utilizando el análisis granulométrico, pero teniendo propiedades plásticas (WL y WP) [9]. El sistema de clasificación AASHTO tiene un índice de grupos para comparar los diferentes tipos de suelos dentro de un mismo grupo y es un método utilizado principalmente para obras viales, su evaluación se contempla mediante el IG. [9]. El IG se establece como un número entero y en el caso de ser negativo sería 0, la clasificación de suelos por el método AASHTO permite determinar la calidad relativa de suelos, terraplenes, sub-rasantes, sub-bases y bases [8].

Cuando el suelo es NP o el LL no puede ser determinado, en ese caso el IG sería cero y si un suelo se considera altamente orgánico, se debe clasificar como A-8 por inspección visual y diferencia de humedades [8].

Se clasifica con las condiciones de la Figura 6, que debe cumplir de izquierda a derecha, el valor de IG debe siempre ir en paréntesis posterior al símbolo del grupo [8].

Figura 6 Clasificación de suelos según sistema AASHTO

Clasif. General	Materiales Granulares ( 35% o menos pasa la malla n° 200 )						Limos y Arcillas ( 35% pasa malla n° 200 )				
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Subgrupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5/A - 7 - 6
% que pasa tamiz :	50 máx										
N° 10	30 máx	50 máx	51 mín								
N° 40	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	
N° 200											
Caract. Bajo N° 40											
LL				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
IP	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
IG	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Gravas y Arenas		Arena fina	Gravas y arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos arcillosos	
Terreno fundación	Excelente		Excelente	Excelente a bueno				Regular a malo			

**El índice de Plasticidad del subgrupo A - 7 - 5 es menor o igual a ( LL - 30 )**  
**El índice de Plasticidad del subgrupo A - 7 - 6 es mayor a ( LL - 30 )**

Fuente [8]

## **2.2 TEORÍA DE PRODUCCIÓN DE LOS HIDROCARBUROS**

**2.2.1 El petróleo.** El petróleo se encuentra en considerables cantidades bajo la superficie de la tierra, es un líquido de origen natural de apariencia oleosa. Sus derivados se emplean en la producción de combustibles, materia prima para la industria química. El crudo y sus derivados se usan para producir otros subproductos como pinturas, textiles, objetos de plástico y para generar electricidad. Algunos tipos de petróleo pueden contener pocos compuestos de oxígeno, azufre, pero todos están compuestos de hidrocarburos, el petróleo también contiene partículas sólidas, líquidas y gaseosas. [10]

Aunque desde el siglo XVI se sabía que los indígenas utilizaban el petróleo que afloraba de la tierra, pero los acontecimientos que comenzaron a enmarcar el desarrollo de una nación petrolera fue cuando fue revertida a la nación la concesión que había sido otorgada a don Roberto De Mares en la región de Barrancabermeja. [11]

**2.2.2 Exploración.** Habitualmente explorar hidrocarburo no es una labor fácil pero si es apasionante; buscar y encontrar petróleo es el resultado de la interacción del hombre con la naturaleza en un medio inhóspito [12].

Explorar es afrontar el reto de encontrar riquezas naturales en lo oculto de nuestra geología. Este desafío lo ha tomado personas con visión y deseo de evolución, si se comparan los exploradores de hoy con los primeros exploradores, ellos tuvieron más visión y aspiración que conocimiento; más valor y ansias de grandeza que herramientas tecnológicas, más fuerza y ambición de aventura que proyección financiera [13].

El explorador es un visionario que antes de tomar la decisión, se sienta y evalúa la lógica de los hechos naturales conocidos hasta el momento, y toma la iniciativa de asumir un mayor riesgo económico con la probabilidad de acertar [13].

Para la exploración de crudo es posible hablar de dos métodos:

### ***Exploración Geológica, Exploración Geofísica.***

**2.2.2.1 Exploración geológica:** Consiste en ubicar cuencas sedimentarias localizadas geológicamente. En este proceso se usan diferentes métodos de exploración. Los métodos directos perforan pozos exploratorios, los cuales en Colombia varían entre 800 y 7000 metros de profundidad dependiendo de la región a la cual se le atribuye la posibilidad de existencia de petróleo. Es muy importante que durante la perforación de estos pozos, se circule un lodo de perforación, lo cual adiciona dureza y consistencia a las paredes del pozo, expulsa el material triturado y enfría la broca. El material que se extrae de estos pozos permite analizar el tipo de roca que se está atravesando, y así saber si hay indicios de hidrocarburos. (Figura 7)

**Figura 7. Perforación Exploratoria**



Fuente: [14]

Geológicamente hablando Colombia cuenta con una inmensa riqueza petrolera como lo es la formación La Luna, ésta es una de las más grandiosas rocas generadoras de hidrocarburos. Pero tuvieron que pasar 60 años para que en nuestro país se lograra el segundo mejor hallazgo de un campo muy extenso como lo fue Caño Limón en 1983. Y 10 años después se encontró otro campo: Cusiana-Cupiagua [15].

Los métodos indirectos consisten en fotografías aéreas e imágenes satelitales. El reconocimiento de campo es también considerado un método de exploración geológica porque el geólogo se encamina a descubrir las rocas y los suelos expuestos con el fin de trazar un mapa geológico del suelo. El geólogo también deberá determinar la composición química mineralógica y contenido de fósiles en las muestras para así determinar su edad y origen. Dependiendo de los resultados arrojados por estas investigaciones, se puede avanzar en la exploración con métodos más precisos [16].

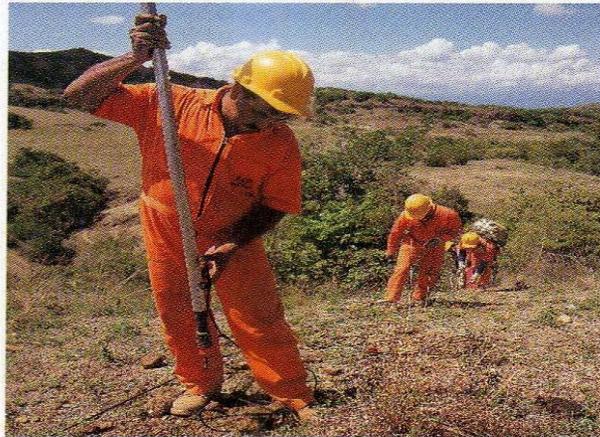
### **2.2.2.3 Exploración Geofísica**

- **Exploración Sísmica**

La exploración sísmica permite conocer con mejor exactitud depósitos en el subsuelo, como por ejemplo trampas de gas metano (Figura 8). Este método consiste en generar ondas sonoras artificiales que son producidas por la detonación de un producto llamado Sismigel, el cual se ubica en pozos de 8 centímetros de diámetro y entre 5 y 15 metros de profundidad. Las ondas generadas se propagan por el subsuelo generando pequeños ecos que son percibidos por geófonos de alta sensibilidad; estos están unidos entre si y van a una unidad de registro. La información obtenida es procesada y analizada para

lograr modelar un esquema de la distribución de material rocoso en el subsuelo. [17].

**Figura 8. Operadores efectuando trabajos de Sísmica.**



Fuente: [18]

- **Exploración magnética (Magnetometría)**

La exploración magnética consiste en usar el campo magnético generado por la tierra y su variación con la latitud. Este campo magnético es generado por estructuras y cuerpos que se encuentran en el subsuelo. Su intensidad depende del contenido de magnetita y materiales magnéticos. Permite localizar cuerpos minerales, zonas de falla y modelar estructuras geológicas. El sistema usado por este método implementa un magnetómetro instalado en barcos o aviones [19-20].

- **Exploración Gravimétrica (Gravimetría)**

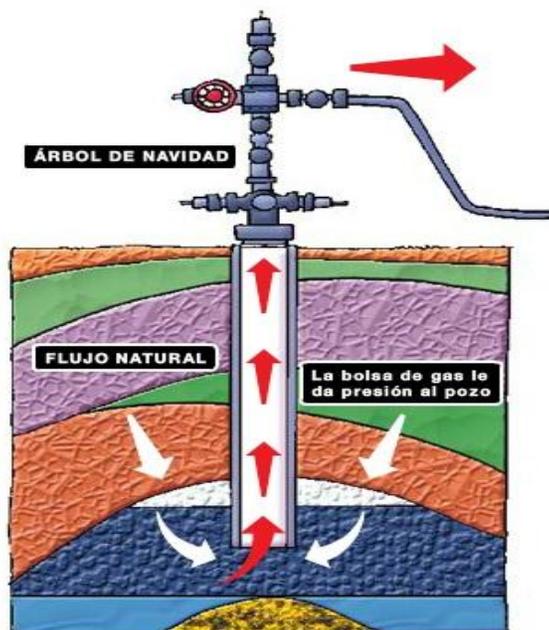
Este método aprovecha las diferencias de gravedad en diferentes sectores, debido a la densidad de los diferentes tipos de material que se encuentran en el área de estudio. Usa una balanza llamada gravímetro; esta balanza es altamente sensible, mide los cambios de peso de una cantidad de masa ubicada dentro del aparato. Estos cambios son debidos a la fuerza de gravedad. Los gravímetros

toman medidas relativas y registran la variación en la posición de un resorte entre dos puntos A y B. [21]

**2.2.3 Explotación.** La explotación o producción de petróleo depende del tipo de yacimiento del cual se va a extraer el petróleo. Para iniciar el proceso de producción de petróleo se perfora la tubería de revestimiento hasta la profundidad donde se encuentran los hidrocarburos, el petróleo fluye hacia el pozo por una tubería de diámetro menor conocida como tubería de Producción.

Si el yacimiento posee energía propia originada por la presión subterránea y los componentes que acompañan al petróleo (agua y gas), el petróleo subirá por sí solo. En este caso se usa un equipo llamado árbol de navidad (Figura 9), que consta de una serie de válvulas que se encargan de regular el paso del petróleo [22].

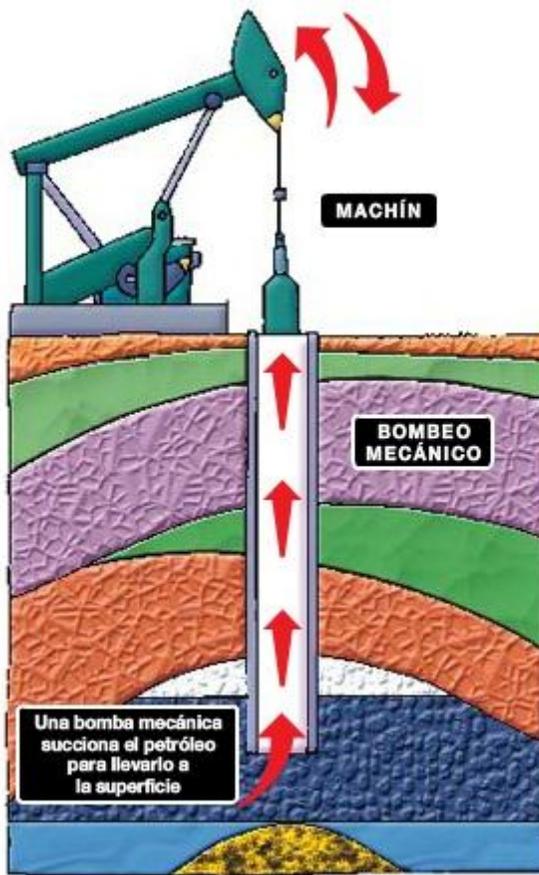
Figura 9. Equipo de Explotación Árbol de navidad



Fuente: [23]

Si la presión no es suficiente, se emplea otro mecanismo de extracción del petróleo llamado machín o balancín. Este es el más usado por las empresas que se dedican a la extracción del petróleo, este sistema mediante un balanceo constante acciona una bomba que succiona el petróleo hacia la superficie, esta se encuentra en el fondo del pozo. El petróleo extraído normalmente está acompañado de agua, gas natural, sedimentos por lo que se debe acondicionar para facilitar la producción separación y almacenamiento (Figura 10).

**Figura 10. Equipo de explotación Machín**



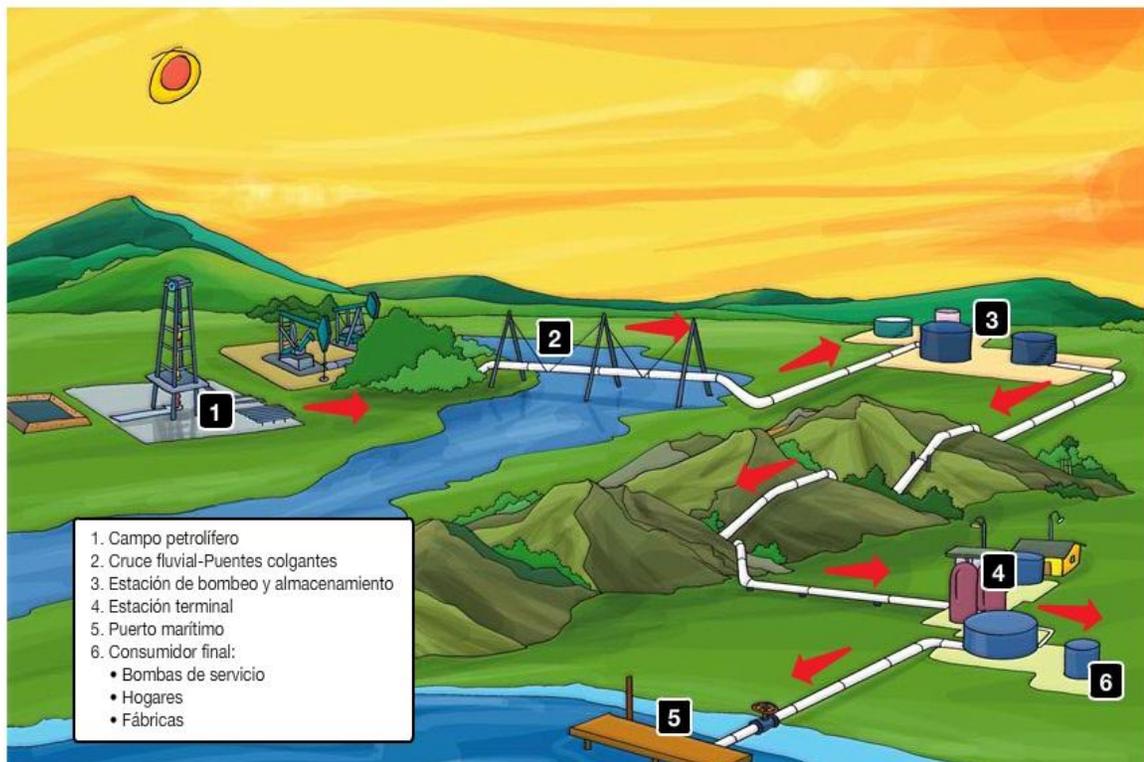
Fuente: [23]

Después de separar los elementos, el petróleo se envía a tanques de almacenamiento y a los oleoductos que lo transportan hacia puertos de exportación o hacia las refinerías. El gas que acompaña al petróleo se envía a

plantas de tratamiento para ser aprovechado en el mismo campo o se envía como “gas seco” hacia los centros de consumo a través de gasoductos [23].

**2.2.4 Transporte.** El siguiente paso de la explotación de un yacimiento es el transporte hacia los centros de refinación o puertos de embarque (Figura 11). Los oleoductos son tubos de acero que transportan el petróleo desde el campo productor hasta un punto de refinación o de embarque. El volumen de transporte de estos oleoductos depende principalmente del diámetro de la tubería. Cuanto más considerable sea el diámetro del tubo mayor es la capacidad de transporte del oleoducto. En Colombia existen oleoductos de 4 hasta 36 pulgadas de diámetro [24].

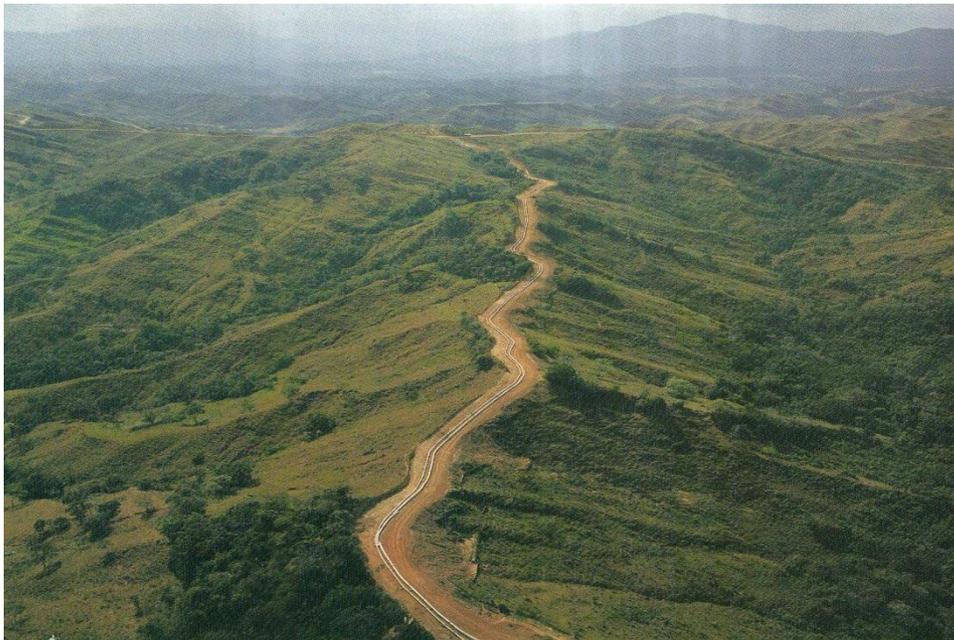
**Figura 11. Esquema del Transporte del crudo.**



Fuente [24]

Estas tuberías pueden ir sobre la superficie, aéreas en puentes colgantes o bajo tierra dependiendo de la topografía del terreno. En Colombia las líneas de acero bajo tierra generalmente están enterradas a 1.2-2.0 metros de profundidad [24]. El oleoducto comienza con una “estación de bombeo” que impulsa el petróleo y dependiendo de la topografía del terreno se ubica estratégicamente otras estaciones de bombeo llamadas estaciones de reimpulso o refuerzo indispensables para que le permitan superar grandes alturas como montañas, cordilleras y trasportar el petróleo hasta la estación final. [24]. La Figura 12 muestra un ejemplo de oleoducto.

**Figura 12. Oleoducto colombiano.**



Fuente: [25]

Los oleoductos también cuentan con válvulas de seccionamiento y válvulas de choque estas permiten controlar el paso del petróleo entre la estación inicial y la estación terminal además de atender oportunamente casos de emergencias. [24] (Figura 13).

**Figura 13. Tramo de Oleoducto en Colombia.**



Fuente: [26]

El gas natural se transporta en similares circunstancias pero la tubería se le llama “gasoducto” [24] (Figura 14). El gas natural se transporta desde las zonas de producción hasta las zonas de consumo esto se hace por medio del Sistema Nacional de Transporte (SNT). Según el decreto 1493 de 2003 del Ministerio de Minas y Energía, el SNT es el conjunto de gasoductos localizados en el territorio colombiano. En Colombia existen varios campos de producción de gas natural como lo son las cuencas de la Guajira y los llanos orientales [27].

**Figura 14. Tramo gasoducto**



Fuente [28]

**2.2.5 Refinación.** Para finalizar el proceso el petróleo llega a las refinerías donde básicamente es cocinado por esta razón al petróleo se le denomina “Crudo” [29]. Una refinería es un complejo donde inicialmente el petróleo crudo se somete a un proceso de separación física o destilación y después a otra cantidad de procesos químicos que permiten extraerle una gran variedad de componentes que contiene.

El petróleo contiene una gran variedad de compuestos tanto que se pueden extraer más de dos mil productos. El petróleo se clasifica en cuatro categorías: parafínico, nafténico, asfáltico o mixto y aromático.

Los productos que se extraen del proceso de refinación se llaman derivados y existe dos tipos: los combustibles, entre estos se tienen el A.C.P.M, la gasolina. etc.; y los petroquímicos, como benceno, polietileno.

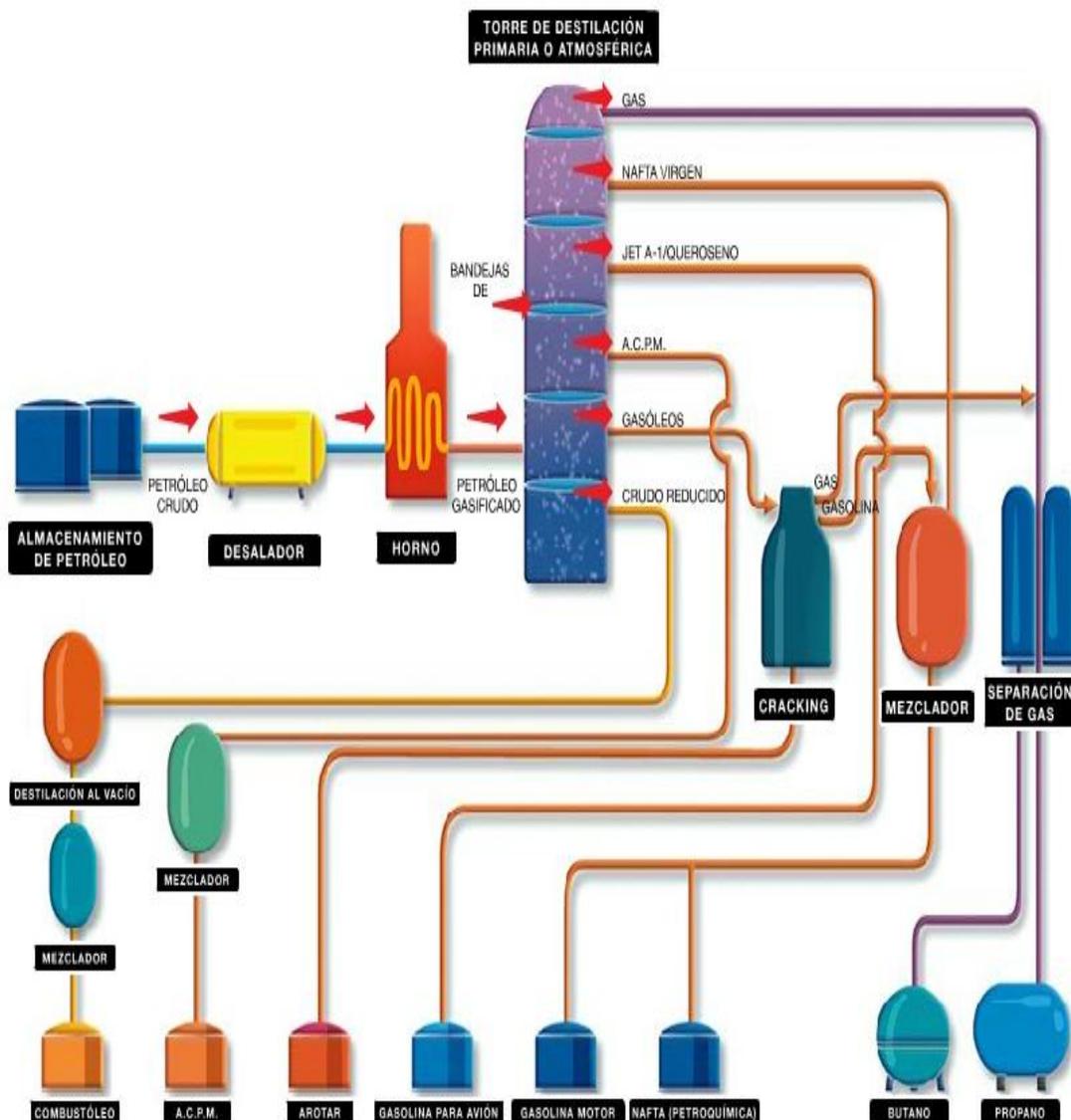
Las refinerías son distintas unas de otras. Esto se debe a la diferencia entre capacidad, tecnología y esquemas de proceso que utilicen. Existen para procesar crudos livianos, crudos pesados o mezclas de ambos. La refinación se cumple en

varias fases por esto la refinerías requieren una gran cantidad de torres, unidades, equipos de tubería. Es algo similar a una metrópoli de plantas de proceso [29].

En Colombia existen dos refinerías: la refinería de Cartagena cuyos propietarios son Ecopetrol y Glencore International y está ubicada en la zona industrial de Mamonal, 10 minutos del centro histórico de Cartagena en la Costa Atlántica; y el complejo industrial en Barrancabermeja propiedad de Ecopetrol, que está localizada en el departamento de Santander. A esta refinería que se encuentra en Barrancabermeja se le llama “complejo industrial” porque además de producir combustibles también es productora de petroquímicos e industriales [29].

Una refinería de este tipo funciona de la siguiente manera: el proceso se inicia en las torres de “destilación atmosférica” o “destilación primaria” en el interior de estas torres se opera con una presión cercana a la atmosférica y están fraccionadas en varios compartimientos llamadas “bandejas” o “platos” cada bandeja trabaja a una temperatura diferente y cumplen la función de separar los componentes del petróleo [29]. (Figura 15).

Figura 15. Proceso de Refinación del crudo



Fuente [29]

El crudo llega a estas torres después de cocinarse en hornos a 400 °C que lo convierten en vapor. Estos vapores entran por la parte inferior de las torres de destilación y ascienden por entre las bandejas. El crudo a medida que sube pierde calor. Cuando cada uno de los componentes encuentra su temperatura se condensa y se deposita en cada una de las bandejas las cuales se encuentran

conectadas a una serie de ductos en los que se recogen las distintas corrientes que se separaron en esta etapa [29].

En el fondo queda el petróleo que no se evaporó en la primera etapa. En esta etapa se cumple el primer paso de la refinación del cual se han obtenido: crudo reducido, A.C.P.M., gasóleos, queroseno, turbosina, y gases como propano, butano [29].

La turbosina, el A.C.P.M, queroseno son ya productos finales. Las corrientes restantes se envían a otras unidades y torres para someterlos a otros procesos de los cuales al final se conseguirá el resto de derivados del petróleo.

El reducido de crudo se envía a la torre de “destilación al vacío” de la cual se extraen bases parafinicas y gasóleos pesados. La unidad de Craqueo Catalítico o Cracking obtiene los crudos reducidos y gasóleos provenientes de la primera etapa para producir gasolina y gas propano. La planta de mezclas recibe las corrientes de naftas para producir la gasolina de motor corriente y extra. Algunos petroquímicos como el tolueno, xilenos, benceno, ciclo hexano se obtienen por medio de la unidad de Aromáticos a partir de la nafta [29].

A final de todo este proceso también se extrae el azufre y el combustóleo que es lo último que sale del petróleo.

El complejo Industrial de Barrancabermeja registró un promedio diario en 2006 aproximadamente de 231.969 barriles para procesarlos y obtener combustibles y demás derivados. La refinería más grande del mundo se encuentra en el noroccidente de Venezuela llamado complejo refinador de Paraguaná es el conjunto de tres refinerías que procesan 900 mil barriles de crudo diario. [29]

Todas las refinerías deben tener un sistema de desfogue como se muestra en la Figura 16:

**Figura 16. Sistema de Desfogue de una Refinería.**



Fuente: [29]

### 3. METODOLOGÍA

La preparación de la muestra de suelo se realizó con una combinación entre abono orgánico y suelos arenos arcillosos (SC), en un porcentaje correspondiente a 60% y 40% respectivamente. Para la elaboración de los ensayos de caracterización de los suelos, se siguieron las Normas INVIAS del año 2007, las cuales describen los procedimientos a seguir para la realización de los ensayos utilizados dentro del estudio.

Las muestras de suelo analizadas se denotan como:

**S0:** corresponde al suelo no contaminado

**S1:** corresponde al 5% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 15 días

**S2:** corresponde al 5% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 45 días

**S3:** corresponde al 10% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 15 días

**S4:** corresponde al 10% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 45 días

**S5:** corresponde al 15% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 15 días

**S6:** corresponde al 15% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 45 días

**S7:** corresponde al 30% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 15 días

**S8:** corresponde al 30% de contaminación en porcentaje en peso de suelo seco, a los 45 días

### **3.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS**

Las muestras de suelos fueron tomadas en la zona de Bucaramanga y Floridablanca. Los suelos tipo Abono orgánico se obtuvieron del municipio de Floridablanca, en el Vivero el Bosque, ubicado o en el sector de cañaveral y el suelo Areno Arcilloso (SC) se obtuvo de la Obra del Viaducto de la Novena ubicado en Bucaramanga.

### **3.2 RECOLECCIÓN DE CRUDO**

El crudo utilizado dentro del estudio con el cual se contaminó la muestra de suelo Orgánica fue suministrado por Ecopetrol en febrero de 2011.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO TIPO ORGÁNICO**

Para la preparación del suelo tipo orgánico ajustado con un porcentaje de 60% Abono orgánico y 40% Arena arcillosa (SC) se compraron 4 tanques plástico con ruedas para un mejor desplazamiento. En los tanques se almacenaron las diferentes concentraciones de contaminación en porcentaje en peso de 5, 10, 15 y 30.

### **3.4 CONTAMINACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Primero se le realizaron los ensayos correspondientes a la caracterización mecánica de los suelos (gravedad específica, límite líquido y límite plástico, límite de contracción, permeabilidad, corte directo, consolidación y próctor modificado).

En la muestra sin contaminar, se mezclaron 24 kg de la preparación del suelo tipo orgánico ajustado con un porcentaje de 60% Abono orgánico y 40% Arena arcillosa (SC). Además se le realizaron unos ensayos adicionales los cuales

fueron: Granulometría, colorimetría y contenido orgánico de suelos mediante pérdida por ignición.

Posteriormente, se realizó la contaminación de los 24kg para el 5% (Figura 17). Dicha mezcla se hizo por fases, vertiéndose una porción de suelo y una porción de crudo a la vez. Esta mezcla se hizo con la ayuda de una batidora de cocina para obtener un resultado más uniforme y sin grumos.

**Figura 17 Proceso de contaminación del suelo**



Las contaminaciones restantes de 10,15 y 30 por ciento se realizaron de la misma manera. La contaminación con el 30 por ciento presento más dificultad debido a la cantidad de crudo usado en este proceso se utilizó un contenedores de mayor capacidad y el uso de una pala para mejorar la homogeneidad de la contaminación, Cada combinación tuvo su envase plástico, en el cual se dejaba reposar (curar) hasta cumplir el tiempo estipulado para la toma de ensayos (15 y 45 días). Adicionalmente entre cada contaminación se dejó un tiempo pertinente, el cual permitió la realización de los ensayos dentro de los plazos fijados.

### 3.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

Este ensayo fue realizado a la muestra de suelo tipo Orgánico ajustado con 60% abono Orgánico y 40% Arena Arcillosa (SC). Se tomó material de tres bultos diferentes, se mezclaron y se realizó el cuarteo necesario.

Posteriormente, se pasó al horno con una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  de secado. La muestra de suelo representativa a la cual se le realizó el análisis granulométrico, después del secado, se lavó 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.

Seguido a esto se realizó la selección de la serie de tamices adecuados a la muestra, ordenándolos de mayor a menor, se llevó al proceso de tamizado, haciendo pasar la muestra de suelos por cada uno de los tamices (Figura 18) se determinó la cantidad de material retenido en cada tamiz.

**Figura 18 Proceso de tamizado**



Finalmente, con la información anterior se realizaron los cálculos pertinentes al ensayo como se muestra en el capítulo de resultados.

### **3.6 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS**

Como primer paso dentro del desarrollo del ensayo, se calibró el picnómetro número uno (1), el cual fue utilizado a lo largo de todo el proyecto (9 ensayos), calibrándose de la siguiente manera:

Se dividió el picnómetro en tres partes en cada parte se adicionó agua y al mismo tiempo se desairó con la bomba de succión, terminando el agua en la parte inferior del menisco.

Dicho procedimiento se realizó tres veces con el agua a diferentes temperaturas (fría, al clima y cálida).

Posteriormente, se tomó una muestra de suelo con humedad natural, como lo recomienda la norma I.N.V.E -128, para los suelos con un alto contenido de materia orgánica, dicha muestra se tamizó a través de la malla número 10 y de ahí se extrajo la cantidad de suelo necesaria para el experimento.

Seguido a esto, se vertió agua dentro del picnómetro cubriendo su base. Posteriormente, por medio de un embudo se introdujo el suelo cucharada por cucharada y se agitó el envase airosamente por cada una. Se tuvo especial cuidado en que la mezcla de agua y suelo no sobrepasara el menisco. Una vez la mezcla se encontraba uniforme, se procedió a desairar por medio de la bomba de succión en tres fases, de la misma manera como se realizó la calibración del picnómetro.

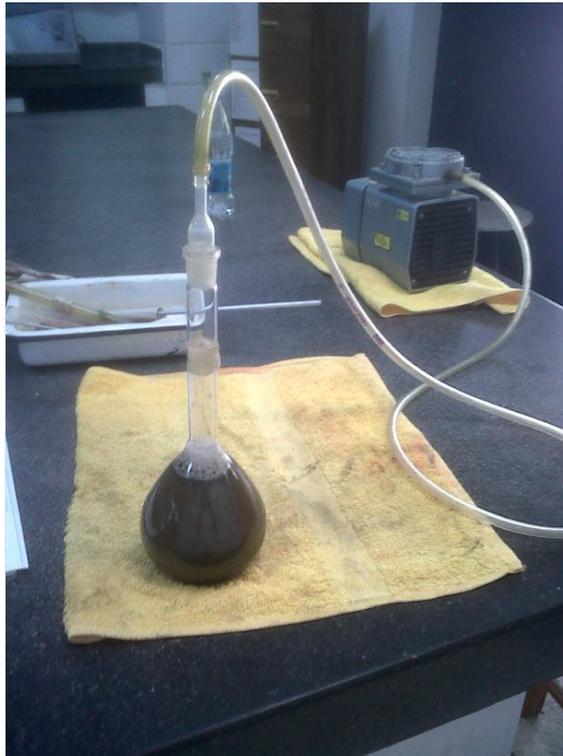
La agitación vigorosa acompañada de pequeñas cantidades de suelo se vio necesaria ya que a partir de la contaminación del 5%, el suelo se tornó impermeable y no mostraba una buena mezcla con el agua, producía pequeñas esferas de suelo seco que flotaban sobre la superficie del líquido, esto por debido a que el crudo envolvía las partículas de suelo generando un capa impermeable las cuales se deshacían con el movimiento (Figura 19).

**Figura 19 Muestra de la impermeabilidad adquirida por del suelo**



Una vez la mezcla de suelo más agua desairada estaba bajo el menisco, se procedió a tomar los datos de su peso, temperatura y se vertió en un platón previamente pesado. Luego se introdujo al horno y se tomó su peso a las 24 horas. Con estos datos se realizaron los cálculos pertinentes al ensayo de gravedad específica.

**Figura 20 Ensayo de Gravedad especifica**



### **3.7 LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO DEL SUELO**

En la realización del ensayo de límites, se tomó una muestra de suelo y se pasó a través de la malla del tamiz número 40 (aproximadamente 600 gr). Para la recolección de dicha muestra, no se aconseja secar el suelo contaminado (en cualquier porcentaje), por medio de la ignición, ya que pierde plasticidad, en su remplazo se aconseja secar a temperatura ambiente bajo el sol.

Posteriormente se mezcló una porción de suelo en una cazuela de cerámica y se mezcló con agua lentamente, se introdujo la mezcla dentro de la Copa de Casa grande con sus respectivas características, se realizó la división por medio del ranurador curvo como se muestra en la Figura 21.

Seguido a esto, se buscó primero en el límite líquido, se obtuvo la mezcla de más de 25 golpes y así posteriormente se le añadió agua hasta obtener dos muestras por debajo de 25 golpes y dos por encima.

**Figura 21 Ensayo de límite líquido**



Una vez se tuvieran las cuatro muestras, en donde fue necesario varios intentos de humedad en la mezcla para llegar a obtener el número de golpes requeridos, se introdujeron las cuatro muestras de suelo al para su secado **al horno a  $110\pm 5$  °c** alrededor de 24 horas, antes de esto ya se habían pesado previamente las capsulas vacías y con suelo húmedo. Finalmente se realizaron los cálculos de humedad, con los cuales se obtuvo el límite líquido.

Por otra parte con la misma muestra de suelo de los 600 gr anteriormente recolectada, se realizaron los rollos para el cálculo del límite plástico. Sobre un vidrio esmerilado, tomando como diámetro de ejemplo una vara de soldadura, se

fabricaron dos muestras de rollos, hasta que se fisuraron teniendo el mismo diámetro de la soldadura, acto seguido se introdujeron al horno para tomar su humedad y se calculó el valor del límite líquido correspondiente, como demuestra en el capítulo de resultados.

### **3.8 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS**

Dentro de la realización del ensayo de contracción siempre se utilizaron guantes como medida de seguridad dentro del laboratorio, para evitar el contacto directo de la piel con el mercurio.

Primero se tamizó una muestra de suelo a través de la malla número 40. De allí se obtuvo 200 gr aproximadamente. Posteriormente la muestra se llevó a una vasija de porcelana, se le adicionó agua mientras se mezcló hasta obtener una consistencia pastosa. La consistencia obtenida se situó en un rango de mayor o igual al límite líquido, dicha consistencia pastosa permitió la expulsión de partículas de aire presentes dentro de la muestra por medio de pequeños golpes en la base de las capsulas, con el fin de obtener pastillas completamente macizas.

Después, se tomaron los datos necesarios para el ensayo, como: peso de dos capsulas circulares limpias, peso de las capsulas más mercurio y peso de las capsulas con grasa lubricante en su interior.

Acto seguido se procedió a la realización de las pastillas, en las cuales se dividieron las capsulas en tres capas. Se introdujo el suelo por cada una y en el intervalo de cada división se le proporcionaban pequeños golpes a la bases de las capsulas, por medio de los cuales el material expulsaba burbujas de aire hacia la superficie, las cuales se pudieron observar a simple vista.

Posteriormente, una vez realizadas las pastillas, se dejaron secar al aire hasta que los bordes internos de las masas de las pastillas se separaran del recipiente. En la norma I.N.V.E-127 Específica que las pastillas se dejan secar al aire hasta que su color cambie de oscuro a claro, pero en este caso el color oscuro permanecía por lo cual se decidió tomar el punto de referencia anteriormente nombrado.

Una vez el secado al aire finalizó, se procedió a pasarlas al horno. Luego de 24 horas se tomaron los siguientes datos : peso de las capsulas más suelo seco y peso del mercurio desplazado; este último se obtuvo sumergiendo las pastillas secas dentro de una taza de vidrio enrasada con mercurio utilizando una placa plástica con tres puntas de bronce, se introdujeron las pastillas. También se tuvo un especial cuidado con que las burbujas de aire salieran en su totalidad, una vez sumergida la pastilla se tomó el peso del mercurio que se desplazó (Figura 22). Con este dato y todos los anteriormente tomados se realizaron los cálculos de contracción pertinentes como se encuentra en el capítulo de resultados.

**Figura 22 Pastilla de suelo posterior al desplazamiento del mercurio**



### **3.9 RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)**

Para el ensayo de compactación se tomó una muestra de suelo ajustado de 4kg aproximadamente. Por medio de golpes con un mazo de goma se disolvieron los terrones del suelo sin reducir el tamaño natural de las partículas. Posteriormente, se cuarteó y se tomó la cantidad de suelo necesaria para que después de pasado por el tamiz número 4, finalmente se obtuviera 7000 gr de suelo como muestra para el ensayo.

Seguido a esto, se procedió al secado de la muestra. Como el suelo se encontraba contaminado con crudo en diferentes porcentajes (5,10,15 y 30), se consideró peligroso hacerlo en el horno, por lo cual el secado se realizó por medio de un secador de cabello. El suelo se extendió sobre un platón metálico plano. Encima de la muestra se extendió una tela, a la cual se le realizaron varios cortes con unas tijeras, con el fin de que permitiera el paso del aire, la evaporación del líquido y contuviera el suelo dentro del platón sin permitir que este se dispersara por la fuerza del viento con el paso del secador, como se muestra en la Figura 23.

**Figura 23 secado de la muestra de suelo**



Posteriormente, se le adicionó agua a la mezcla de suelo, inicialmente el 4% en la mayoría de los casos. Luego, se vertió el suelo en el molde cilíndrico, el cual se hizo en 5 capas de 55 golpes cada una; se tomó el peso del molde más el suelo húmedo como referencia y se extrajo una muestra del centro del molde para calcular su humedad (Figura 24).

**Figura 24 Ensayo de próctor modificado**



Una vez vaciado el cilindro, se le agregó más agua a la mezcla (aproximadamente el 4%). Se repite el procedimiento anteriormente nombrado hasta que el peso de molde más suelo húmedo caiga. Después, introdujeron las capsulas resultantes en el horno. Con estos datos se realizaron los cálculos de humedades óptimas para los distintos grados de contaminación del suelo en los diferentes tiempos.

### **3.10 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS (CABEZA VARIABLE)**

Para la realización del ensayo de permeabilidad, se disminuyó la humedad del suelo con un secador manual como se referenció anteriormente. Luego, se escogió la muestra por cuarteo, golpeándola con un mazo de goma para deshacer los terrones, teniendo cuidado de no disminuir el tamaño natural del suelo. Posteriormente se pasó por el tamiz número 4 y se recolectaron 7000 gr del producto.

En una bandeja metálica se esparció el suelo y se le añadió agua hasta llegar a su humedad óptima anteriormente calculada en el ensayo de próctor modificado. Posterior a esto, se realizó la compactación del suelo en un molde cilíndrico con 5 capas de 55 golpes cada una.

La pastilla de suelo necesaria para la realización del ensayo se extrajo por medio de un muestreador circular, el cual se introduce dentro del molde anteriormente compactado por medio de un mazo de hierro. Luego, se retiró la pastilla del molde con la ayuda de un destornillador de pala.

Una vez se tuvo la pastilla, se tomó su peso y se procedió a montar el ensayo de permeabilidad de la siguiente manera:

- se engrasó el borde externo de toda la pastilla y el borde interno del cilindro plástico del ensayo
- después se introdujo la placa porosa, sobre ella un papel filtro
- luego se introdujo la muestra de suelo y se apisonaron sus bordes con una varilla de punta plana
- nuevamente se colocó un papel filtro
- y por último, una segunda piedra porosa
- posteriormente, se introdujo el resorte dentro del sistema
- y, finalmente se llenó de agua hasta el borde del cilindro plástico y se tapó.

Ya realizado el montaje del sistema, se instaló la regleta con la tubería incorporada a la misma altura de la base del permeámetro, se introdujo agua en la tubería y se dejó en saturación por 24 horas.

Al día siguiente se tomaron todos los datos necesarios para ensayo como temperatura del agua, diámetro de la tubería y alturas H1 y H2 de los meniscos en varias ocasiones aproximadamente en intervalos de media hora (Figura 25).

**Figura 25 Ensayo de permeabilidad de los suelos**



### **3.11 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE (MÉTODO DE CORTE DIRECTO)**

Para la realización del ensayo de corte directo se necesitó tres pastillas cuadradas, las cuales se extrajeron de un molde de próctor modificado que fue compactado con la humedad óptima, en 5 capas de 55 golpes cada una.

Posteriormente se ensablo la pastilla dentro de la caja de corte con todas sus placas alineadas y se bloqueó con los dos tornillos laterales para prevenir cortes prematuros en la muestra.

Luego, se instaló la caja de corte dentro de la maquina digital, se retiraron los tornillos bloqueadores, y se colocó en la balanza el peso correspondiente para un  $\sigma$  de 2, 1 y 0,5 Kg/cm<sup>2</sup>. Para cada una de las tres muestras.

Se encendió la maquina con una velocidad de 1mm/minuto y se tomaron todos los datos necesarios para realizar los cálculos en cada una de las pastillas, datos como: lectura del dial, deformación vertical, humedad de la muestra, peso del molde más suelo húmedo, peso del molde, altura y diámetro de la muestra (Figura 26).

**Figura 26 Ensayo de corte directo**



### **3.12 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO EN SUELOS MEDIANTE PÉRDIDA POR IGNICIÓN**

Se tomó una muestra de 100 gr que paso por el tamiz número 10, se pasó la muestra al horno aproximadamente con  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  por 24 horas.

Posteriormente se remueve la muestra del horno, se coloca en crisoles tarados. Teniendo en cuenta que la mufla se encontraba averiada y no se podía utilizar se colocaron los crisoles en la estufa eléctrica a lo largo de 6 horas (recomendado por el laboratorista Eli Rueda). Una vez cumplido este tiempo se tomó su peso y se calculó el contenido de material orgánico perdido.

### 3.13 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS

Para la realización del ensayo de consolidación se necesitó una pastilla circular, la cual se extrajo de un molde de próctor modificado que fue compactado con la humedad óptima, en 5 capas de 55 golpes cada una.

Una vez se tuvo la pastilla se recolectaron los siguientes datos : área de la muestra, altura, humedad inicial, con estos datos se calculó la primera carga de consolidación de una serie de cuatro cargas y cuatro descargas, distribuidas así : carga de  $0,5 \text{ kg/cm}^2$ , carga de  $1 \text{ kg/cm}^2$ , carga de  $2 \text{ kg/cm}^2$ , carga de  $4 \text{ kg/cm}^2$ , descarga de  $4 \text{ a } 2 \text{ kg/cm}^2$ , , descarga de  $2 \text{ a } 1 \text{ kg/cm}^2$ , descarga de  $1 \text{ a } 0,5 \text{ kg/cm}^2$  y descarga de  $0,5 \text{ a } 0 \text{ kg/cm}^2$ .

La pastilla se instaló en el Consolidómetro y se ajustó el dial en ceros para la realización de las lecturas pertinentes. Posteriormente a cada ciclo de carga y descarga se le registró la deformación versus tiempo de 8 horas por cada uno.

Una vez finalizada la última descarga se procedió al desmonte de la pastilla y se tomaron los datos del peso de la muestra seca más anillo y el peso del anillo (Figura 27). Con todos los datos obtenidos anteriormente se realizaron los cálculos correspondientes al ensayo de consolidación como se muestra en los resultados.

Se tuvo especial cuidado con la ubicación del Consolidómetro puesto que el laboratorio utilizado para este ensayo es de uso académico por lo que se colocaron letreros y cinta de precaución para evitar que los estudiantes manipularan el Consolidómetro.

**Figura 27 ensayo de consolidación**



### **3.14 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE COLORIMETRÍA**

Este ensayo fue realizado para corroborar el ensayo de determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición, ya que este ensayo es usado en arenas que se utilizan en la preparación de concretos hidráulicos y morteros.

Inicialmente se pesaron 450 gr de suelo por el método de cuarteo manual. Posteriormente, se preparó la botella de vidrio incoloro de aproximadamente 240 a 470 ml de capacidad nominal, se añadió el suelo hasta 130 ml de la escala de la botella referenciada anteriormente; seguido a esto, se adicionó la solución de hidróxido de sodio hasta que el volumen total de líquido más suelo fueran aproximadamente igual a 200 ml después de ser agitado vigorosamente. Se dejó reposar durante 24 horas.

Pasadas las 24 horas se comparó el líquido que sobrenadaba en la solución que contenía el suelo. La comparación se hizo poniendo junto el frasco y los vidrios de colores de referencia y comparó contra un fondo claro (Figura 28).

**Figura 28 contenido de materia orgánica por colorimetría**



## 4. RESULTADOS

El desarrollo de este proyecto permitió caracterizar mecánicamente el suelo, tipo orgánico con el cual se adelantó el presente estudio, identificando las variaciones o cambios sufridos por causa de las diferentes contaminaciones de crudo. Además permitió el análisis de dichas variaciones a lo largo del tiempo, en unas fechas establecidas de 15 y 45 días, ya que cuando se presenta un derrame de crudo, la acción de las autoridades pertinentes no ocurre de manera inmediata, en muchos casos, por no detectarlo a tiempo o por falta de eficiencia en el proceso. Con base a lo anterior, se presentan los resultados obtenidos a lo largo del trabajo.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS UTILIZADOS DURANTE EL ESTUDIO

Las muestras de suelos fueron clasificadas cualitativamente como se indica en la Tabla 3:

**Tabla 3 Notación de los tipos de muestras de suelo utilizados**

<b>Tipo de Muestra</b>	<b>Clasificación</b>
Suelo orgánico sin contaminar	S0
Suelo orgánico contaminado con el 5% de crudo a los 15 días	S1
Suelo orgánico contaminado con el 5% de crudo a los 45 días	S2
Suelo orgánico contaminado con el 10% de crudo a los 15 días	S3
Suelo orgánico contaminado con el 10% de crudo a los 45 días	S4
Suelo orgánico contaminado con el 15% de crudo a los 15 días	S5
Suelo orgánico contaminado con el 15% de crudo a los 45 días	S6
Suelo orgánico contaminado con el 30% de crudo a los 15 días	S7
Suelo orgánico contaminado con el 30% de crudo a los 45 días	S8

## 4.2 SUELO SIN CONTAMINACIÓN (S0)

Para el suelo sin contaminar, los ensayos realizados fueron: *Gravedad Específica de suelos (I.N.V. E – 128)*, *Granulometría (I.N.V. E – 123)*, *Límite líquido (I.N.V. E – 125)*, *Límite plástico (I.N.V. E – 126)*, *Límite contracción (I.N.V. E – 127)*, *Permeabilidad (I.N.V. E – 130)*, *Corte directo (I.N.V. E – 154)*, *Consolidación (I.N.V. E – 151)*, *Próctor Modificado (I.N.V. E – 142)*, *contenido de materia orgánica por ignición (I.N.V. E – 121)* y *colorimetría. (Tabla 4)*

**Tabla 4 Resultados de los ensayos de caracterización del suelo sin contaminar**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	1,68	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		31,71	INV E – 125
Límite plástico %		22,93	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	19,8852853	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,64666336	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,9097	I.N.V. E – 130
	KT =	9,781E-08	
	K20=	8,8978E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	16,9617059	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	0,0712	
Consolidación (Cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de consolidación (CV)	2,1169E-05	I.N.V. E – 151
		4,1605E-05	
		9,8822E-05	
		0,00067246	
		0,00171038	
		0,00136552	
		0,0008754	
		0,00153749	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	22,9	I.N.V. E – 142
Granulometría %	Gravas %	1,66	I.N.V. E – 123
	finos %	36,16	
	Arenas %	62,18	
Contenido de M. Orgánico por ignición %		22%	I.N.V. E – 121
Colorimetría		Más de cinco (5)	

La Tabla 4 muestra los ensayos realizado al suelo tipo orgánico (S0), ajustado con 60% de abono orgánico y 40% de suelos tipo SC sin contaminar, también evidencia los ensayos de: Análisis Granulométrico, contenido de Material Orgánico por ignición y colorimetría, los cuales solo fueron realizados solo a este tipo de suelo (S0), con el fin de obtener más resultados sobre sus propiedades mecánicas y la cantidad de materia orgánica que presenta.

#### 4.3 SUELO CONTAMINADO CON EL 5% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S1)

El suelo contaminado con 5% de crudo luego de 15 días de contaminado presentó variaciones con respecto al suelo original. La Tabla 5 presenta estos resultados.

**Tabla 5. Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 5% de crudo a los 15 días**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	1,72	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		30,83	INV E – 125
Límite plástico %		22,65	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	19,2679606	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,50872596	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,8893	I.N.V. E – 130
	KT =	7,64E-08	
	K20=	6,79E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	15,2269959	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	0,0499	
Consolidación (cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de consolidación (Cv)	6,8603E-05	I.N.V. E – 151
		7,3659E-05	
		0,0002394	
		0,00079007	
		0,00362266	
		0,00173521	
		0,00150313	
		0,00246341	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	22	I.N.V. E – 142

La Tabla 5 presenta los ensayos correspondientes al suelo tipo orgánico ajustado, con una contaminación en porcentaje por peso del 5% de crudo, los cuales fueron realizados 15 días después de dicha contaminación.

Los ensayos de permeabilidad, corte directo y consolidación se realizaron con la humedad óptima del suelo, para lo cual se calculó la cantidad necesaria de agua para alcanzar la humedad óptima en cada uno de los casos por medio de la siguiente fórmula:

$$Cantidad\ de\ Agua = \frac{peso\ del\ suelo}{1 + humedad\ optima} * \frac{humedad\ optima - humedad\ presente}{100}$$

Ecuación 1

#### **4.4 SUELO CONTAMINADO CON EL 5% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S2)**

Como parte del trabajo experimental, se había planteado desarrollar ensayos a los 45 días de ocurrida la contaminación. La Tabla 6 presenta estas variaciones para cada ensayo realizado.

**Tabla 6 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 5% de crudo a los 45 días**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	1,7	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		29,25	INV E – 125
Límite plástico %		22,79	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	13,787346	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,7158814	
Permeabilidad (cm/seg)	$nT/n_{20} =$	0,9097	I.N.V. E – 130
	KT =	6,34E-08	
	K20=	5,77E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ}) =$	20,701578	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm <sup>2</sup> )=	0,0542	
Consolidación (cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de consolidación (Cv)	5,9787E-05	I.N.V. E – 151
		0,0003588	
		0,0002228	
		0,0005558	
		0,0032439	
		0,0015409	
		0,00285303	
		0,0021465	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	16.2	I.N.V. E – 142

#### 4.5 SUELO CONTAMINADO CON EL 10% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S3)

La muestra de suelo utilizada en los ensayos de la Tabla 7 fue seleccionada de acuerdo a la metodología descrita en el presente proyecto. Analizada con una contaminación de porcentaje en peso del 10%, a los 15 días de realizada la mezcla de suelo-crudo, el material permaneció en reposo dentro de un recipiente plástico en del laboratorio de suelos.

**Tabla 7 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 10% de crudo a los 15 días.**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	1,81	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		31,58	INV E – 125
Límite plástico %		20,68	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	14,1112898	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,68947067	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,8694	I.N.V. E – 130
	KT =	4,20E-08	
	K20=	3,65E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	10,7966717	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	0,1818	
Consolidación (cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de Consolidación (Cv)	7,3133E-05	I.N.V. E – 151
		0,00012591	
		0,00037014	
		0,00098736	
		0,00199316	
		0,00378243	
		0,00355478	
0,00286204			
Próctor Modificado	Humedad óptima %	18,6	I.N.V. E – 142

#### 4.6 SUELO CONTAMINADO CON EL 10% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S4)

El material seleccionado para la realización de los ensayos de la Tabla 8 (S4) fue tomado del mismo recipiente plástico donde se encontraba el suelo tipo S3, solo que este se dejó en reposo hasta completar el tiempo estipulado de 45 días.

**Tabla 8 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 10% de crudo a los 45 días**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	2,11	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		29,2	INV E – 125
Límite plástico %		19,75	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	11,6262903	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,71664242	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,8893	I.N.V. E – 130
	KT =	4,10E-07	
	K20=	3,65E-07	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	11,5356309	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	0,2456	
Consolidación (cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de Consolidación (Cv)	0,00031945	I.N.V. E – 151
		0,00035413	
		0,00059976	
		0,00168222	
		0,00066705	
		0,00694779	
		0,00410541	
		0,00058549	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	16,4	I.N.V. E – 142

#### **4.7 SUELO CONTAMINADO CON EL 15%DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S5)**

La muestra de suelo utilizada en los ensayos de las Tabla 9 fue seleccionada de acuerdo a la metodología constituida por el presente proyecto. Analizada con una contaminación de porcentaje en peso del 15%, a los 15 días de realizada la mezcla de suelo-crudo, el material permaneció en reposo dentro de un recipiente hermético.

**Tabla 9 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 15% de crudo a los 15 días.**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	2,09	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		29,74	INV E – 125
Límite plástico %		21,17	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	15,6069566	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,66708314	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,8893	I.N.V. E – 130
	KT =	7,38E-08	
	K20=	6,56E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	13,5932089	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm <sup>2</sup> )=	0,2073	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	12	I.N.V. E – 142

#### **4.8 SUELO CONTAMINADO CON EL 15% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S6)**

El material seleccionado para la realización de los ensayos de la Tabla 10 (S6) fue tomado del mismo recipiente plástico donde se encontraba el suelo tipo S5, solo que este se dejó en reposo hasta completar el tiempo estipulado de 45 días.

**Tabla 10 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 15% de crudo a los 45 días**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	1,67	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		31,74	INV E – 125
Límite plástico%		21,61	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	15,6427105	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,62408028	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,9097	I.N.V. E – 130
	KT =	5,34E-08	
	K20=	4,85E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	13,8527508	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	0,1818	
Consolidación (cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de Consolidación (Cv)	0,00011853	I.N.V. E – 151
		0,00012456	
		0,00032055	
		0,00051065	
		0,00268376	
		0,00060182	
		0,00011448	
		0,00097451	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	14	I.N.V. E – 142

#### 4.9 SUELO CONTAMINADO CON EL 30% DE CRUDO A LOS 15 DÍAS (S7)

El material seleccionado para realizar los ensayos de la Tabla 11 suelo (S7), corresponde a la muestra contaminada en porcentaje por peso del 30, constituida como la mayor proporción de contaminación del suelo realizado en el presente estudio, esta muestra luego del reposo en el recipiente plástico presentó hongos de color blanco en la zona superficial del suelo, el cual no fue removido respetando los cambios biológicos presentes en el material.

**Tabla 11 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 30% de crudo a los 15 días**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	1,73	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		29,90%	INV E – 125
Límite plástico %		20,03%	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	16,3590161	INV E – 127
	Relación de contracción SF	1,5369527	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	0,8694	I.N.V. E – 130
	KT =	6,47E-08	
	K20=	5,62E-08	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	18,5363024	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	0,0074	
Próctor Modificado %	Humedad óptima %	12,6	I.N.V. E – 142

#### **4.10 SUELO CONTAMINADO CON EL 30% DE CRUDO A LOS 45 DÍAS (S8)**

**La muestra seleccionada para la realización de los ensayos de la Tabla 12 (S8),** fue tomada del mismo recipiente plástico donde se almacenaba el suelo tipo (S7), solo que para el presente estudio permaneció en reposo hasta cumplir el tiempo estipulado de 45 días. Una vez cumplido el tiempo se observó que el suelo (S8), el cual presentaba hongos en la parte superior al suelo (S7).

**Tabla 12 Caracterización mecánica del suelo tipo orgánico contaminado con el 30% de crudo a los 45 días**

ENSAYO	RESULTADOS	VALOR	NORMA
Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )	Peso específico	<b>1,47</b>	I.N.V. E – 128
Límite líquido %		<b>30,06%</b>	INV E – 125
Límite plástico %		<b>24,33%</b>	INV E – 126
Límite de contracción %	Límite de contracción WS	<b>16,53395148</b>	INV E – 127
	Relación de contracción SF	<b>1,528947149</b>	
Permeabilidad (cm/seg)	nT/n20=	<b>0,8893</b>	I.N.V. E – 130
	KT =	<b>5,18E-08</b>	
	K20=	<b>4,61E-08</b>	
Corte directo	$\phi(^{\circ})=$	<b>84,65331119</b>	I.N.V. E – 154
	c (Kg/cm2)=	<b>2,5822</b>	
Consolidación (cm <sup>2</sup> /seg)	Coeficiente de Consolidación (Cv)	<b>0,000406045</b>	I.N.V. E – 151
		<b>0,000274644</b>	
		<b>0,002026125</b>	
		<b>0,001672482</b>	
		<b>0,007450894</b>	
		<b>0,007064995</b>	
		<b>0,00554643</b>	
		<b>0,000406396</b>	
Pretor Modificado	Humedad óptima %	<b>10,6</b>	I.N.V. E – 142

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por medio del desarrollo de este estudio se logró caracterizar mecánicamente los suelos de tipo Orgánico ajustados (S0), en sus diferentes concentraciones por peso (5, 10, 15 y 30) de contaminación con crudo.

### 5.1 CON RESPECTO A LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS

**5.1.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de la Gravedad específica por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La Tabla 13, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 13 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo de 15 días**

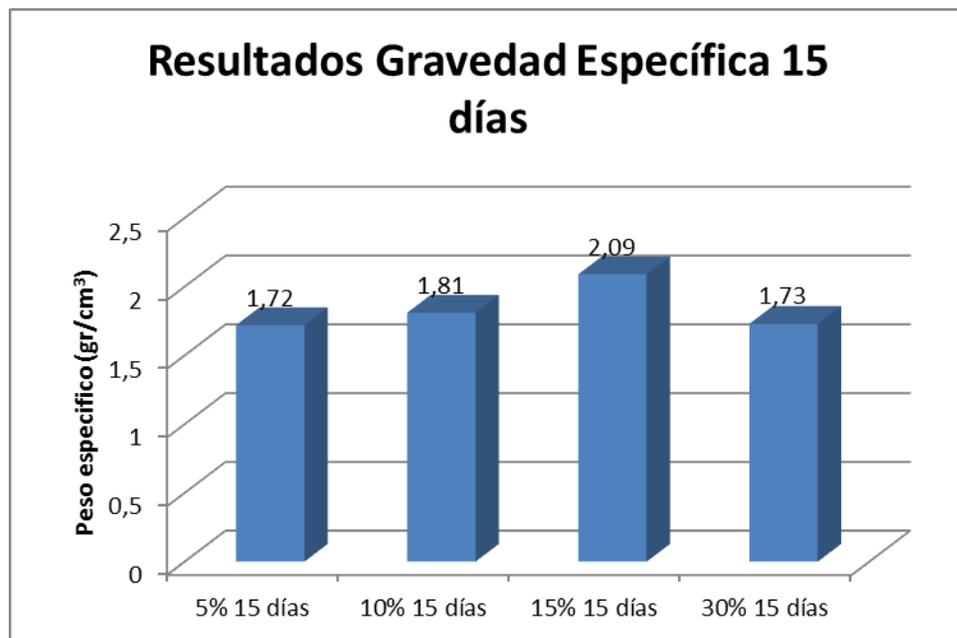
<b>Tipo de suelo</b>	<b>Peso específico (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	1,68	-
5% 15 días	1,72	2,38
10% 15 días	1,81	7,74
15% 15 días	2,09	24,40
30% 15 días	1,73	2,98

Con base en la Tabla 13, la cual evidencia el porcentaje de variación en el peso específico presente en el suelo para los ensayos realizados 15 días después de la contaminación, se evidencia cambios en el porcentaje con respecto a la muestra

de suelo (S0), empezando con el suelo tipo (S1) con un 2.38%, posteriormente aumenta generándose el mayor porcentaje de variación en la muestra de suelo tipo (S5) con un 24.40% y finalmente decae, lo que demuestra que no se genera una tendencia fija, por el contrario se presentan valores muy cambiantes.

En la Figura 29, se pueden observar los resultados de los ensayos de gravedad Específica correspondientes a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 29. Resultados Gravedad Específica de los suelos a los 15 días de contaminación.**



**5.1.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de la Gravedad específica por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 14, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

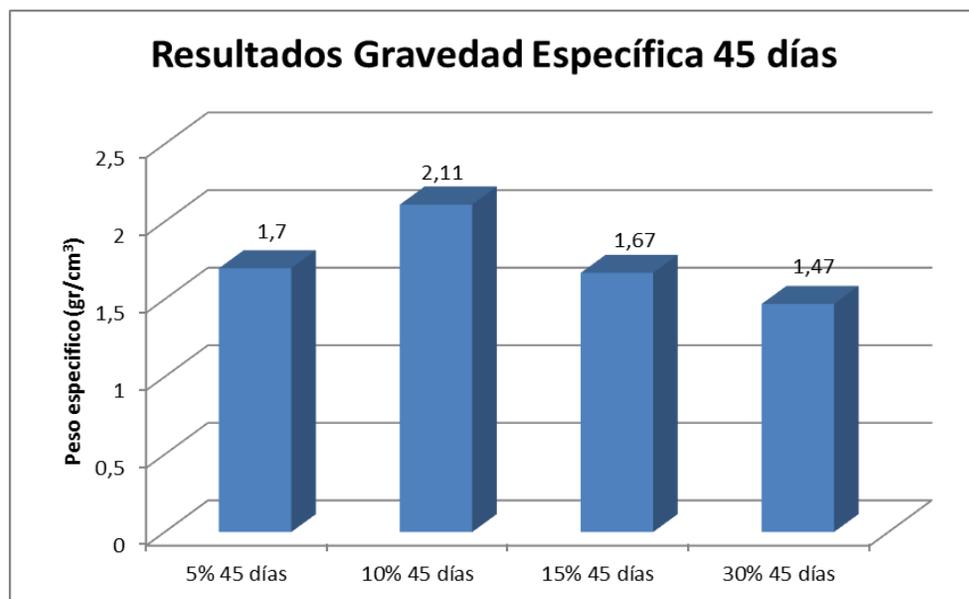
**Tabla 14 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo de 45 días**

Tipo de suelo	Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	% de variación con respecto a la muestra (S0)
No contaminado	1,68	-
5% 45 días	1,7	1,19
10% 45 días	2,11	25,60
15% 45 días	1,67	0,60
30% 45 días	1,47	12,50

Por medio de la Tabla 14, se observa una gran variación de los resultados correspondientes a la gravedad específica de los suelos realizados 45 días posteriores a la contaminación por medio de crudo, con respecto a la muestra de suelo tipo (S0). El peso específico que generó la diferencia porcentual mayor fue el correspondiente a la muestra de suelo tipo (S4) con un 25.60%.

En la Figura 30, se pueden observar los resultados de los ensayos de gravedad específica correspondientes a los 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 30. Resultados Gravedad Específica de los suelos a los 45 días de contaminación.**



**5.1.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados de la Gravedad específica por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S<sub>0</sub>). La siguiente Tabla 15, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

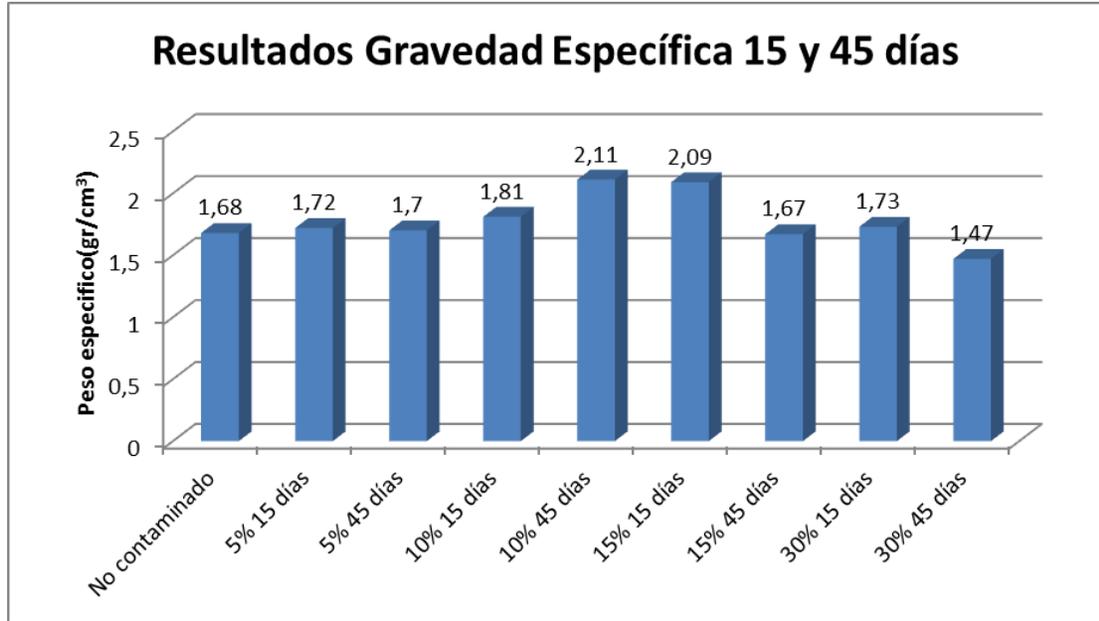
**Tabla 15 porcentajes de Variación de los resultados de gravedad Específica partiendo del suelo (S<sub>0</sub>) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Peso específico (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S<sub>0</sub>)</b>
No contaminado	1,68	-
5% 15 días	1,72	2,38
5% 45 días	1,7	1,19
10% 15 días	1,81	7,74
10% 45 días	2,11	25,60
15% 15 días	2,09	24,40
15% 45 días	1,67	0,60
30% 15 días	1,73	2,98
30% 45 días	1,47	12,50

En la Tabla 15, se observa de forma general el comportamiento que tuvo el peso específico del suelo a lo largo del estudio. Se evidencia que a los 15 días de ocurrido el derrame, en todos los casos, se produjo un aumento en la gravedad específica, con porcentajes de incremento variables. Sin embargo, se observa también que las muestras que tienen alto contenido de crudo (15% y 30%) a los 45 días empieza a descender el valor de la gravedad específica, pudiendo asociarse este hecho al encapsulamiento de suelo por el crudo.

En la Figura 31, se pueden observar los resultados de los ensayos de gravedad específica correspondientes a los 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 31. Resultados Gravedad Específica de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.**



El análisis de la gravedad Específica de los suelos se basó en las Figuras 29, 30 y 31. De acuerdo con la Figura 29 se puede observar que el peso específico de los suelos sufrió variaciones ascendentes a medida que se aumentaba el tiempo y el porcentaje de contaminación, sin embargo se evidencia que al llegar a la contaminación del 30%, la gravedad Específica descendió lo que puede atribuirse a la saturación del suelo producto del crudo, también vale la pena destacar que este tipo de suelo contaminado con el 30% fue el único que presentó hongos de color blanco y las pruebas realizadas no permiten determinar si hubo biodegradación que pudiera técnicamente explicar este hecho.

Por otra parte la Figura 30, correspondiente a los resultados de los ensayos luego de 45 días de reposo, se observa una curva en los valores del peso específico, su

mayor valor se encuentra presente en la muestra de suelo tipo (S4), posteriormente decae.

Ya en un plano mas general, como se encuentra en la Figura 31, se evidencia valores variables, las muestras de suelo tipo (S4) y (S5) presentan los valores mas altos con 2,11 y 2,09 ( $\text{gr/cm}^3$ ) respectivamente, lo que indica que el ensayo de gravedad obtuvo las cifras mas altas cuando la contaminación con crudo se encontraba entre el 10 y el 15%. Los cálculos pertenecientes al ensayo de gravedad específica se encuentran de forma mas detallada en en Anexo A.

Según la Norma INV E – 128 los criterios para juzgar la precisión de los resultados obtenidos en la prueba, corresponden a un rango máximo en la diferencia de los resultados de dos ensayos iguales realizados apropiadamente de (0,11) [30]. Se compararon los resultados por porcentaje de contaminación. Los únicos que cumplieron este criterio fueron los suelos tipo (S1) y (S2) correspondientes a la menor contaminación (5%), con una diferencia de 0,02 unidades en los resultados obtenidos de los dos ensayos realizados al suelo con la misma contaminación (5%). Lo que demuestra que el crudo y el paso del tiempo, genera variaciones significativas en el suelo, tanto así que éstas quedan por fuera del rango de aceptación de la norma.

Según la Tabla 16, el rango para la clasificación de suelo como Turba Orgánica está entre 1.50 – 2.15 ( $\text{gr/cm}^3$ ). Por otra parte, en la Figura 31, se presentan los resultados de gravedad Específica de las diferentes muestras del suelo, en donde se evidencia las variaciones que presentan los datos, sin embargo, el peso específico nunca sale del rango establecido anteriormente, por lo cual permanece clasificado como Turba Orgánica.

**Tabla 16 Valores típicos de Gravedad Específica**

Tipo de suelo		Gravedad Específica (gr/cm <sup>3</sup> )
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
	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

Fuente [31]

## 5.2 CON RESPECTO AL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS

**5.2.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite líquido por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 17, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

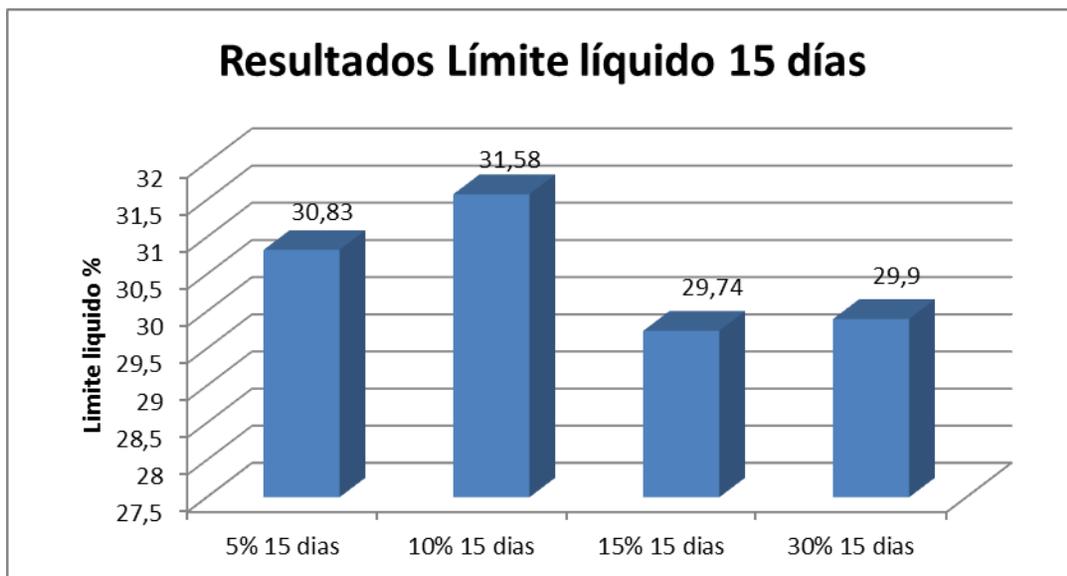
**Tabla 17 porcentajes de Variación de los resultados del Límite líquido partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Límite líquido %</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	31,71	-
5% 15 días	30,83	2,78
10% 15 días	31,58	0,41
15% 15 días	29,74	6,21
30% 15 días	29,9	5,71

En la Tabla 17, correspondiente a los resultados obtenidos en los ensayos del límite líquido de los suelos, realizados a los 15 días posteriores a la contaminación con crudo, se observa un análisis realizado sobre la variación de los resultados partiendo de la muestra de suelo tipo (S0), el cual evidencia porcentajes de cambio bajos en el límite líquido de los suelos, presentándose un 6.21% como el más alto, este último corresponde a la muestra de suelo tipo (S5).

En la Figura 32, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite líquido correspondientes a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 32. Resultados Límite líquido de los suelos a los 15 días de contaminación.**



**5.2.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite líquido por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 18, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

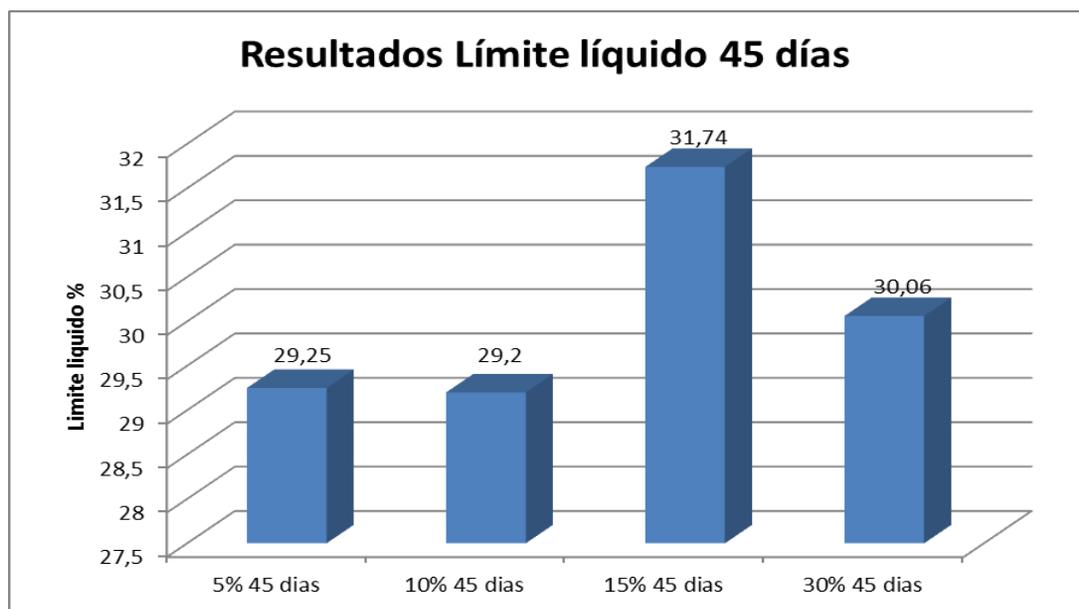
Tabla 18 porcentajes de Variación de los resultados del Límite líquido partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días

Tipo de suelo	Límite líquido %	% de variación con respecto a la muestra (S0)
No contaminado	31,71	-
5% 45 días	29,25	7,76
10% 45 días	29,2	7,92
15% 45 días	31,74	0,09
30% 45 días	30,06	5,20

La Tabla 18, evidencia los porcentajes de variación presentes en el límite líquido del suelo, obtenidos a los 45 posteriores a la contaminación con crudo, se evidencia un descenso en los valores de dichos porcentajes, terminando con una variación del 5.20% en la muestra de suelo (S8), con respecto a la (S0).

En la Figura 33, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite líquido correspondientes a los 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 33. Resultados Límite líquido de los suelos a los 45 días de contaminación.**



**5.2.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite líquido por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 19, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

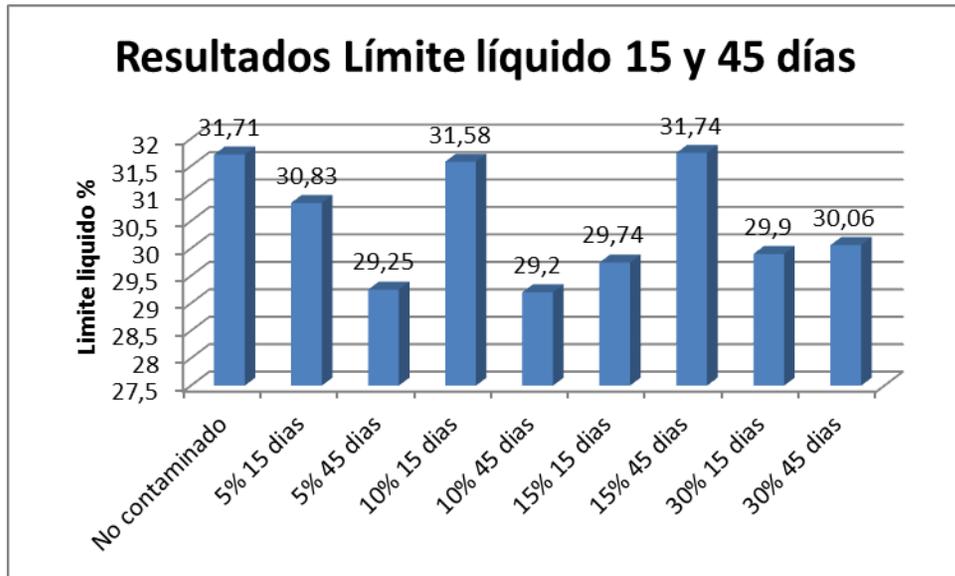
**Tabla 19 porcentajes de Variación de los resultados del Límite líquido partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Límite líquido %</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	31,71	-
5% 15 días	30,83	2,78
5% 45 días	29,25	7,76
10% 15 días	31,58	0,41
10% 45 días	29,2	7,92
15% 15 días	29,74	6,21
15% 45 días	31,74	0,09
30% 15 días	29,9	5,71
30% 45 días	30,06	5,20

En un esquema más general, como el de la Tabla 19, se observa los resultados de la variación del límite líquido en porcentaje debido al cambio de concentraciones de crudo presentes en el suelo y el paso de los días, se hace evidente lo cambiante que se comportan las muestras de suelo, ya que no siguen ningún patrón, se destacan las (S1) y (S8) ya que al ser las de menor y mayor concentración de crudo arrojaron una variación del 2.78 y 5.20 % respectivamente, indicando una mayor brecha entre los resultados del límite líquido de las muestras (S0) y (S8), esta última con el mayor porcentaje y tiempo de contaminación.

En la Figura 34, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite líquido correspondientes a los 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 34. Resultados Límite líquido de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.



De acuerdo con los resultados de la Figura 32, correspondiente a los ensayos realizados 15 días después de la contaminación, el límite líquido de los suelos es variable, se observa un pico en la muestra tipo (S3) con un límite líquido del 31,58%.

En las Figuras 33 y 34, se observan resultados variables. El límite líquido del suelo varía constantemente según el porcentaje de contaminación con crudo y el tiempo que se vió expuesto a él, los picos más altos se hacen presentes en las muestras de suelo tipo (S3) y (S6) con 31,58 y 31,74 respectivamente. Los cálculos pertinentes al ensayo de Límite líquido se encuentran de forma mas detallada en el Anexo B.

Según la Norma INV E-125, para límites líquidos que se encuentren entre 21 y 67, dos resultados obtenidos por diferentes operadores no pueden variar más del 13% de uno a otro [32], según lo anterior y observando la Tabla 34, la cual evidencia que los datos obtenidos se encuentran entre el rango de 21 a 67, por lo tanto la norma sí aplica. Por otra parte se realizó la comparación de resultados por

porcentajes de contaminación, es decir el único cambio de un ensayo al otro fue el tiempo que permaneció expuesto al crudo (15 y 45 días), la comparación en todos los casos arrojó datos inferiores al 13% expuesto por la norma lo cual indica que cumple.

Aunque el límite líquido de los suelos presenta valores fluctuantes, sus diferencias se encuentran dentro de los valores de precisión de la norma.

Se observaron los resultados del suelo tipo (S0), los cuales arrojaron un límite líquido e Índice de plasticidad de 31,71 y 8.78% respectivamente. Según la Figura 3, este tipo de suelo, se encuentra clasificado dentro de la clase (OL) suelo orgánico de baja plasticidad.

A continuación se presentan los resultados del índice de plasticidad de las diferentes muestras de suelo (Tabla 20).

**Tabla 20 Valores del índice de plasticidad de las muestras de suelo**

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Índice de Plasticidad</b>
S0	8,78%
S1	8,18%
S2	6,46%
S3	10,90%
S4	9,45%
S5	8,57%
S6	10,13%
S7	9,87%
S8	5,73%

Con los datos de índice de plasticidad presentes en la Tabla 20, y los resultados de los límites plásticos, se clasificaron los suelos con la ayuda de la Figura 3, de la siguiente manera:

**Tabla 21 Clasificación de los suelos por medio de la carta de plasticidad**

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Clasificación</b>
S0	OL
S1	OL
S2	OL
S3	CH
S4	CH
S5	OL
S6	CH
S7	CH
S8	OL

En la Tabla 21, se observa la clasificación de los diferentes tipos de suelo, los cuales se constituyen en su mayoría como (OL) orgánicos de baja plasticidad. En el caso de los suelos (S3, S4 S6 Y S7) se presentan como (CH) arcilla de alta plasticidad, sin embargo estos últimos se encuentran muy cercanos a la línea A, la cual los separa de los suelos tipo OL.

### **5.3 CON RESPECTO AL LÍMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS**

**5.3.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite Plástico por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 22, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

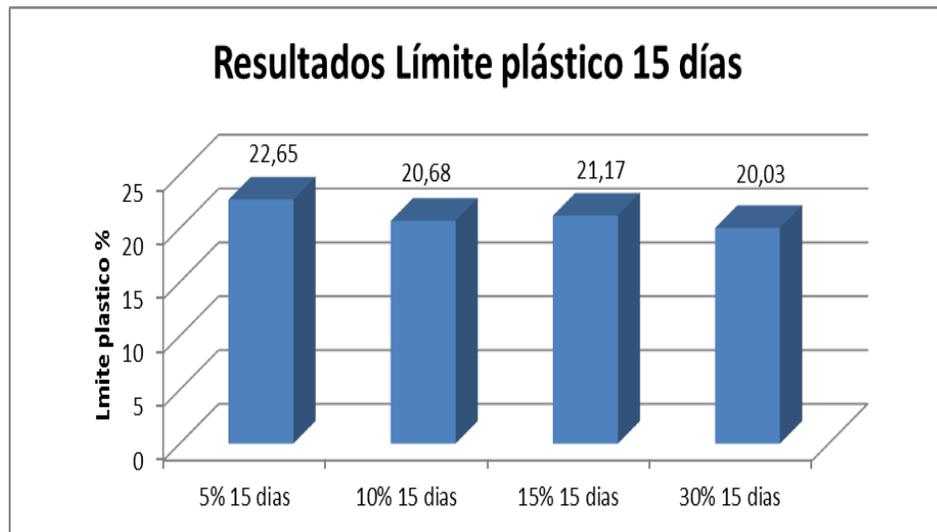
**Tabla 22 porcentajes de Variación de los resultados del Límite Plástico partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Límite Plástico %</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	18,85	-
5% 15 días	22,65	20,16
10% 15 días	20,68	9,71
15% 15 días	21,17	12,31
30% 15 días	20,03	6,26

En la Tabla 22, se observan las variaciones en los resultados del límite plástico del suelo presentados a los 15 días posteriores a la contaminación, se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), se evidencia los cambios presentados en el límite plástico de los suelos, destacándose las muestras tipo (S1) y (S7), las cuales presentan una variación de los datos con relación a la muestra (S0) del 20.16 y 6.26 % respectivamente, destacándose una variación mucho más baja en la muestra contaminada con el 30% de crudo.

En la Figura 35, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite plástico correspondientes a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 35. Resultados Límite plástico de los suelos a los 15 días de contaminación.**



**5.3.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite Plástico por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 23, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

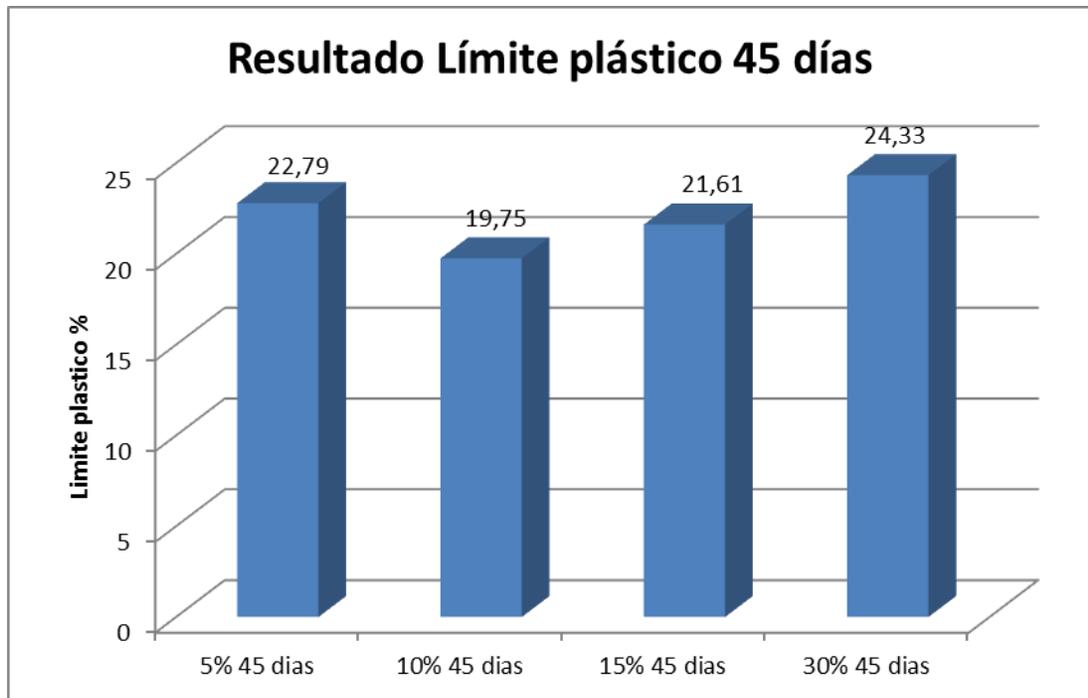
**Tabla 23 porcentajes de Variación de los resultados del Límite Plástico partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días**

Tipo de suelo	Límite Plástico %	% de variación con respecto a la muestra (S0)
No contaminado	18,85	-
5% 45 días	22,79	20,90
10% 45 días	19,75	4,77
15% 45 días	21,61	14,64
30% 45 días	24,33	29,07

La Tabla 23, hace referencia a los porcentajes de variación del límite plástico de los suelos correspondiente a los ensayos realizados 45 después de la contaminación, se realizó un análisis comparativo partiendo del da la muestra de suelo no contaminada (S0), dentro de los porcentajes de variación se destacas las muestras de suelo tipo (S3) y (S8), con 4.77 y 29.07% respectivamente. Estas muestras se constituyen como la de menor y mayor variación del límite líquido de los suelos en relación con la muestra (S0), vale la pena destacar que la de mayor variación es la muestra contaminada con el mayor porcentaje de crudo (30%).

En la Figura 36, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite plástico correspondientes a los 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 36. Resultados Límite plástico de los suelos a los 45 días de contaminación.**



**5.3.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite Plástico por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 24, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 24 Porcentajes de Variación de los resultados del Límite plástico partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Límite Plástico %</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	18,85	-
5% 15 días	22,65	20,16
5% 45 días	22,79	20,90
10% 15 días	20,68	9,71
10% 45 días	19,75	4,77
15% 15 días	21,17	12,31
15% 45 días	21,61	14,64
30% 15 días	20,03	6,26
30% 45 días	24,33	29,07

La Tabla 24, proporciona un análisis más general de los resultados de las variaciones en el límite plástico en todas las muestras de suelo a los 15 y 45 días, con respecto al tipo (S0), se destaca un aumento significativo en la variación del material tipo (S8) correspondiente a la contaminación y tiempo de exposición mas altos al crudo con un 29.07% de variación. Dicho comportamiento puede atribuírsele a la gran cantidad de saturación con del suelo, el cual presentó hongos de color blanco (la contaminación correspondiente al 30% de crudo fue la única que genero hogos en el suelo).

En la Figura 37, se pueden observar los resultados de los ensayos de Límite plástico correspondientes a los 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 37. Resultados Límite plástico de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.**



El análisis de resultados del límite plástico de los suelos se basó en las Figuras 35, 36 y 37. Según la Figura 35 correspondiente a los resultados de los ensayos realizados a los 15 días posteriores a la contaminación con crudo, se observa un descenso constituyéndose como el valor más grande el límite plástico correspondiente a la muestra de suelo tipo (S1).

En la Figura 36, correspondiente a los resultados de los ensayo realizados a los 45 días posteriores a la contaminación, se puede apreciar que el límite plástico asciende, terminando con el valor más grande el suelo tipo (S8) correspondiente a la contaminación del 30%, dicha contaminación se contituye como la más alta del estudio, lo que demuestra que el crudo incidió en la variación del límite plástico del suelo.

Por otra parte en la Figura 37, se evidencia de manera mas general las variaciones de los datos, se destaca el suelo tipo (S0), el cual presenta un límite plástico de 18,85 , aunque a lo largo del estudio el valor de la plasticidad varió, nunca volvió a ser tan baja como en el suelo (S0) y finalizó con un pico en el suelo (S8) con un valor de 24,33.

Este suelo corresponde a la contaminación más alta del estudio (30%) con 45 días de realizada la mezcla, lo cual indica la influencia que tiene sobre la plasticidad el contenido de crudo y el tiempo al que se ve expuesto a él. Los cálculos pertinentes al ensayo de Límite plástico se encuentran de forma más detallada en el Anexo C.

Según la Norma INV E-126, para los suelos que presenten un límite plástico entre 15 y 32, los cuales hayan sido realizados por diferentes operadores, no deben diferir dos resultados entre sí en mas de un 18% de su promedio [33].

En la Figura 37, se observa que todos los resultados oscilan entre 15 y 32 por ciento por lo cual la norma aplica. Posterior a esto se realizó una comparación entre los resultados por porcentajes, los cuales arrojaron que, en ninguno de los casos se produjo una diferencia entre los valores promedios de mas del 18%, por tanto se encuentran por dentro del parámetro de precisión, es decir, la contaminación por medio del crudo no produjo cambios tan drásticos que hicieran salir los datos del parámetro de la norma.

## **5.4 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE CONTRACCIÓN**

**5.4.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del Límite de contracción por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 25, contiene los porcentajes

de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 25 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Límite de contracción %</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>	<b>Relación de contracción %</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	19,89	-	1,65	-
5% 15 días	19,27	3,10	1,5	8,91
10% 15 días	14,11	29,04	1,68	2,02
15% 15 días	15,61	21,52	1,66	0,81
30% 15 días	16,36	17,73	1,54	6,66

La Tabla 25, hace referencia a los porcentajes de variación del límite de contracción y relación de contracción de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 días después de la contaminación, se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), en la Tabla se observa los cambios generados en el límite de contracción, se destaca un aumento significativo de la variación al comprar los porcentajes de los suelos (S1) y (S7), con un 3,10 y 17,73 % respectivamente, esto demuestra la incidencia de la contaminación por medio de crudo en los resultados, ya que estas muestras cuentan con el 5 y 30 % de contaminación con crudo respectivamente.

En la Figura 38, se pueden observar los resultados de los ensayos de factores de contracción correspondientes a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 38. Resultados Límite de contracción de los suelos a los 15 días de contaminación.



**5.4.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de los factores de contracción por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 26, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

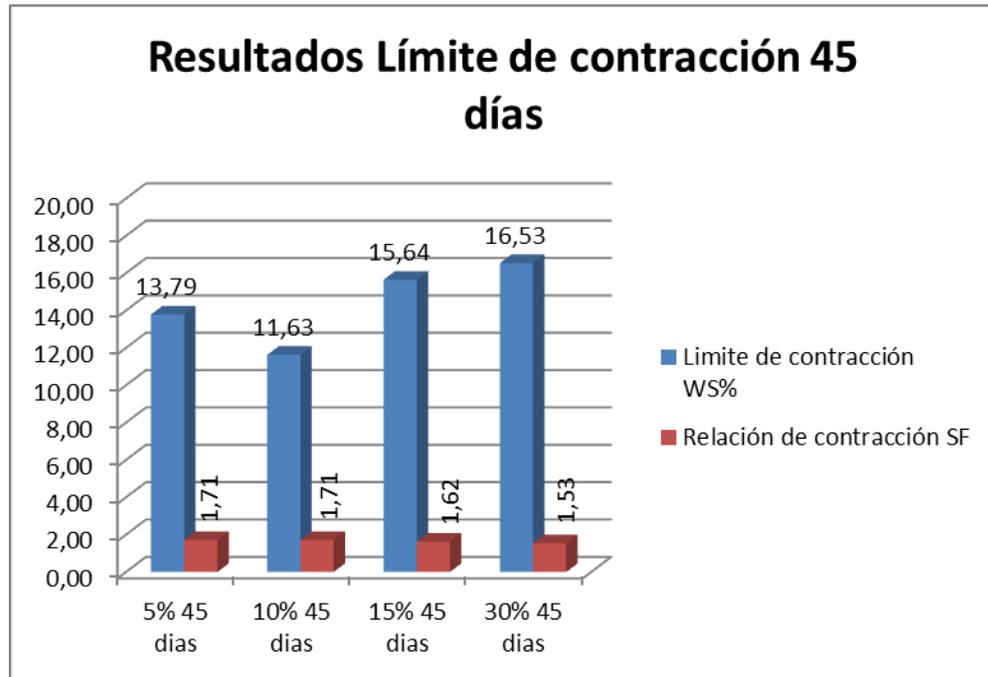
Tabla 26 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días

Tipo de suelo	Límite de contracción %	% de variación con respecto a la muestra (S0)	Relación de contracción %	% de variación con respecto a la muestra (S0)
No contaminado	19,89	-	1,65	-
5% 45 días	13,79	30,67	1,71	3,85
10% 45 días	11,63	41,53	1,71	3,85
15% 45 días	15,64	21,34	1,62	1,62
30% 45 días	16,53	16,85	1,53	7,15

La Tabla 26, hace referencia a los porcentajes de variación del límite de contracción y relación de contracción de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0). Se observa una variación menor en los resultados correspondientes a la relación de contracción, presentándose así los cambios más significativos en el límite de contracción de los suelos, lo que indica que es la característica mecánica que más se afectó. Es importante destacar que las mayores variaciones se presentaron en el límite de contracción, no obstante este tiene una tendencia descendente como lo indican los tipos de suelo (S2) y (S8), con una variación de 30,67 y 16,85 %, respectivamente. Por otra parte, las variaciones en los resultados de la relación de contracción con respecto a la muestra (S0), aunque inferiores, presentan una tendencia ascendente como lo demuestran las muestras (S2) y (S8), con una variación del 3,85 y 7,15 % respectivamente, con relación al suelo no contaminado (S0).

En la Figura 39, se pueden observar los resultados de los ensayos de factores de contracción correspondientes a los 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 39. Resultados Límite de contracción de los suelos a los 45 días de contaminación.



**5.4.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados de los factores de contracción por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 27, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

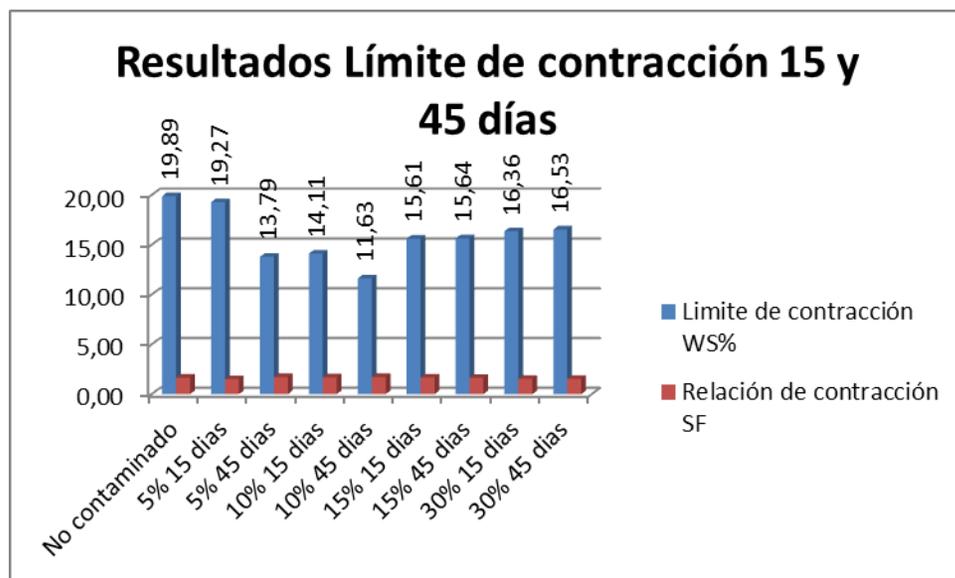
Tabla 27 porcentajes de Variación de los resultados en los factores de contracción partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días

Tipo de suelo	Límite de contracción %	% de variación con respecto a la muestra (S0)	Relación de contracción %	% de variación con respecto a la muestra (S0)
No contaminado	19,89	-	1,65	-
5% 15 días	19,27	3,10	1,5	8,91
5% 45 días	13,79	30,67	1,71	3,85
10% 15 días	14,11	29,04	1,68	2,02
10% 45 días	11,63	41,53	1,71	3,85
15% 15 días	15,61	21,52	1,66	0,81
15% 45 días	15,64	21,34	1,62	1,62
30% 15 días	16,36	17,73	1,54	6,66
30% 45 días	16,53	16,85	1,53	7,15

La Tabla 27 proporciona un análisis más general de los resultados de las variaciones en el límite plástico en todas las muestras de suelo a los 15 y 45 días, con respecto al tipo (S0). En las variaciones correspondientes a los límites de contracción, se destaca la tendencia descendente en los resultados del límite de contracción por la contaminación por medio de crudo, en los diferentes porcentajes y tiempos; por otra parte, los resultados correspondientes a la relación de contracción también varían con respecto a la muestra de suelo no contaminada (S0), aunque en menor proporción.

En la Figura 40, se pueden observar los resultados de los ensayos de factores de contracción correspondientes a los 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 40. Resultados Límite de contracción de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.**



El análisis de los resultados para los factores de contracción de las diferentes muestras de suelo se basó en las Figuras 38, Figura 39 y Figura 40. Según la Figura 38, la cual corresponde a los resultados obtenidos a los 15 días

posteriores a la contaminación, se observa una curva en los datos, con un pico en el suelo tipo (S1), el cual presenta un límite de contracción  $W_s\%$  del 19.27. Posteriormente, la Figura 39 presenta los resultados obtenidos los 45 días luego de la contaminación con crudo y se evidencia un ascenso en los valores de la contracción terminando con la cifra más alta en el suelo tipo (S8) con 16.53%. Finalmente, en un esquema más general como el que brinda la Figura 40, se observa el suelo tipo (S0) correspondiente al no contaminado con el  $W_s\%$  más alto (19.89), lo que indica una disminución del factor de contracción debido al paso del tiempo y a las diferentes concentraciones de contaminación con crudo.

Por otra parte, la relación de contracción se presenta cambiante, al iniciar el estudio el suelo tipo (S0) presenta una SF de 1.65, generando una curva en los datos; posteriormente aumenta, evidenciando un pico en el suelo tipo (S4) con 1.71, y finalmente se comparó con el suelo tipo (S8), el cual se constituye como el de mayor contaminación con crudo (30%) y tiempo de reposo (45 días), presentando una SF de 1.53. Por tanto se demuestra que el suelo adquirió cambios en sus factores de contracción debido a los porcentajes de contaminación con crudo y el tiempo al que se vió expuesto al mismo, disminuyendo su relación de contracción (SF). Los cálculos pertinentes al ensayo de límite de contracción se encuentran de forma mas detallada en el Anexo D.

Según la Norma INV E-127, la precisión del ensayo de factores de contracción para varios operarios es de 6.8, el cual se encuentra constituido como la diferencia máxima entre dos resultados de dos pruebas hechas apropiadamente [34].

A continuación se presentan dos resultados del límite de contracción de cada tipo de muestra de suelo (Tabla 28).

**Tabla 28 Resultados de precisión de los factores de contracción**

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Límite de contracción WS% Capsula 1</b>	<b>Límite de contracción WS% Capsula 2</b>	<b>Diferencia entre los resultados</b>
S0	19,89	20,08	0,00
S1	19,27	18,71	0,56
S2	13,79	14,89	1,10
S3	14,11	13,69	0,42
S4	11,63	12,54	0,91
S5	15,61	15,12	0,49
S6	15,64	16,48	0,83
S7	16,36	17,33	0,97
S8	16,53	15,30	1,23

En la Tabla 28, se observa que la diferencia entre los dos ensayos realizados de factores de contracción se encuentran dentro de la norma, ya que ninguno excede el máximo permitido de 6.8.

## **5.5 CON RESPECTO A LA PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS**

**5.5.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de Permeabilidad de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 29, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

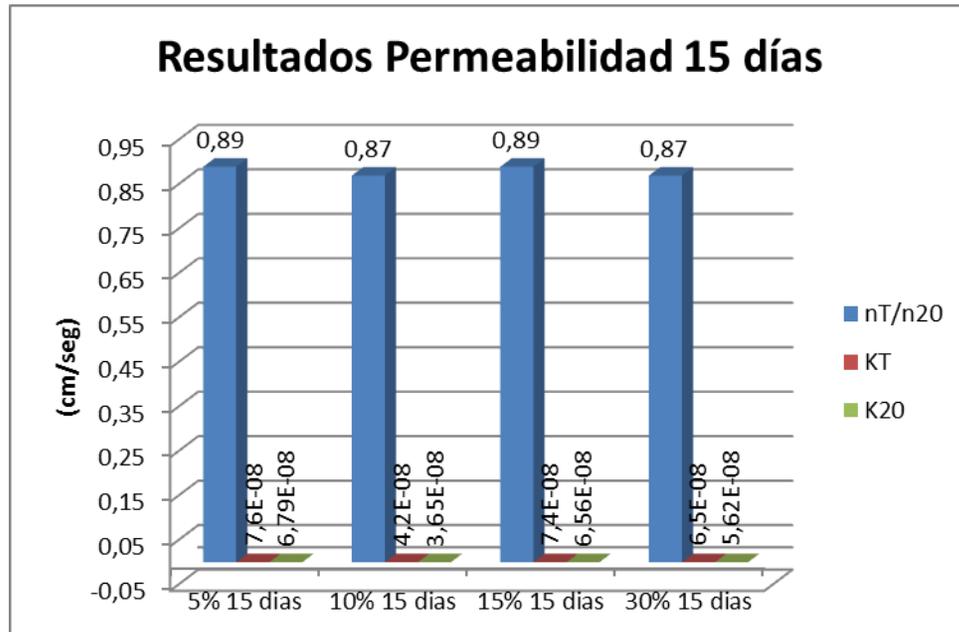
**Tabla 29 porcentajes de Variación de los resultados en permeabilidad partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

Tipo de suelo	Resultados (cm/seg)			% de variación con respecto a la muestra (S0)		
	$n_T/n_{20}$	$K_T$	$K_{20}$	$n_T/n_{20}$	$K_T$	$K_{20}$
-						
No contaminado	0,91	9,8E-08	8,9E-08	-	-	-
5% 15 días	0,89	7,6E-08	6,79E-08	2,2	21,9	23,7
10% 15 días	0,87	4,2E-08	3,65E-08	4,4	57,1	59,0
15% 15 días	0,89	7,4E-08	6,56E-08	2,2	24,6	26,3
30% 15 días	0,87	6,5E-08	5,62E-08	4,4	33,9	36,8

La Tabla 29, hace referencia a los porcentajes de variación en la permeabilidad de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 días después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0). En los resultados de variación se observan los mayores porcentajes de cambio, con respecto al suelo tipo (S0), en la columna  $K_{20}$ , la cual presenta en la muestra de suelo tipo (S7), un 36,8% de variación,  $n_T/n_{20}$  evidencia la menor variación de los resultados en la muestra tipo (S7) con un 4,4 %. Por otro lado  $K_T$  muestra un cambio con respecto al suelo no contaminado de 33,9% en la muestra (S7).

En la Figura 41, se pueden observar los resultados de permeabilidad correspondientes a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 41. Resultados Permeabilidad de los suelos a los 15 días de contaminación.



**5.5.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de Permeabilidad de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La Tabla 30, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

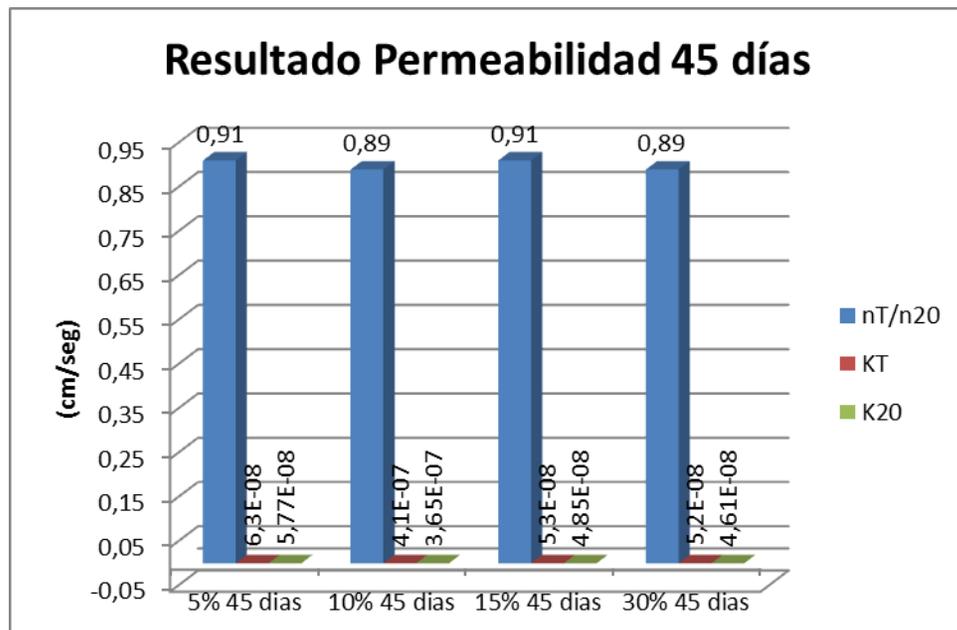
Tabla 30 porcentajes de Variación de los resultados en permeabilidad partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días

Tipo de suelo	Resultados (cm/seg)			% de variación con respecto a la muestra (S0)		
	n <sub>T</sub> /n <sub>20</sub>	K <sub>T</sub>	K <sub>20</sub>	n <sub>T</sub> /n <sub>20</sub>	K <sub>T</sub>	K <sub>20</sub>
-	0,91	9,8E-08	8,9E-08	-	-	-
No contaminado	0,91	9,8E-08	8,9E-08	-	-	-
5% 45 días	0,91	6,3E-08	5,77E-08	0,00	35,19	35,19
10% 45 días	0,89	4,1E-07	3,65E-07	2,24	319,39	309,98
15% 45 días	0,91	5,3E-08	4,85E-08	0,00	45,44	45,44
30% 45 días	0,89	5,2E-08	4,61E-08	2,24	47,01	48,20

La Tabla 30 hace referencia a los porcentajes de variación en la permeabilidad de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), se evidencia porcentajes de variación bajos. Con respecto a los resultados de permeabilidad para la muestra de suelo tipo (S0), en los resultados correspondientes a  $n_T/n_{20}$ , presentándose variaciones del 0,0% en las muestras de suelo (S2) y (S8). Por otro lado el  $K_{20}$  presenta variaciones en los resultados de permeabilidad con respecto a la muestra de suelo tipo (S0) altos, especialmente en el tipo (S4), la cual varía un 309,98 % con respecto al suelo no contaminado.

En la Figura 42, se pueden observar los resultados de permeabilidad correspondientes a los 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 42. Resultados Permeabilidad de los suelos a los 45 días de contaminación.



**5.5.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados de Permeabilidad de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La Tabla 31, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 31 porcentajes de Variación de los resultados en permeabilidad partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días**

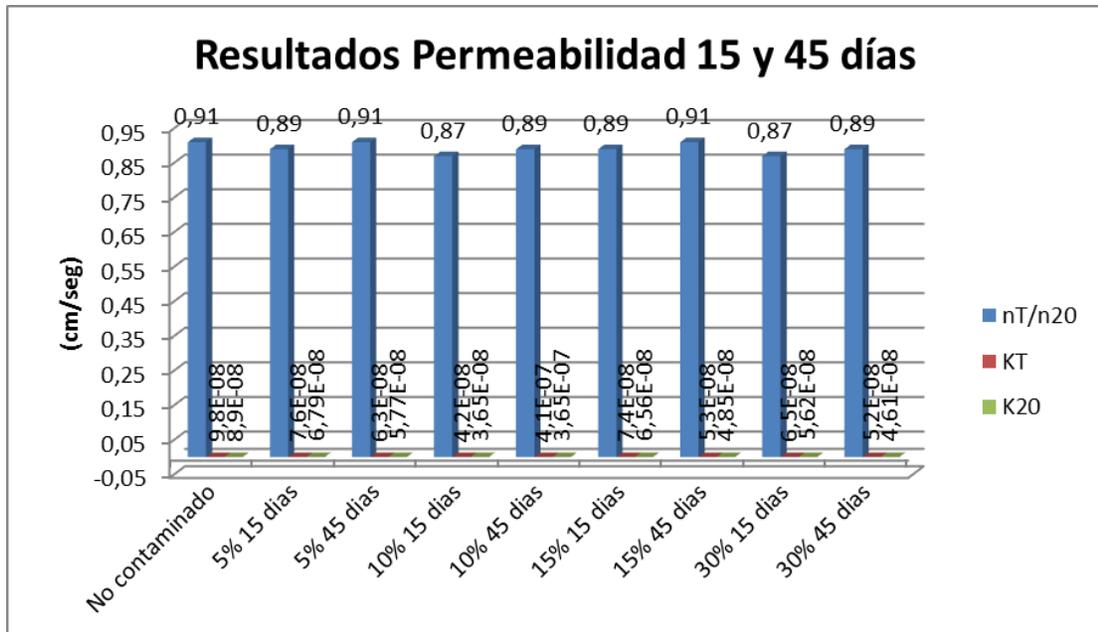
Tipo de suelo	Resultados (cm/seg)			% de variación con respecto a la muestra (S0)		
	$n_T/n_{20}$	$K_T$	$K_{20}$	$n_T/n_{20}$	$K_T$	$K_{20}$
-	0,91	9,8E-08	8,9E-08	-	-	-
No contaminado	0,91	9,8E-08	8,9E-08	-	-	-
5% 15 días	0,89	7,6E-08	6,79E-08	2,2	21,9	23,67
5% 45 días	0,91	6,3E-08	5,77E-08	0,0	35,2	35,19
10% 15 días	0,87	4,2E-08	3,65E-08	4,4	57,1	58,96
10% 45 días	0,89	4,1E-07	3,65E-07	2,2	319,4	309,98
15% 15 días	0,89	7,4E-08	6,56E-08	2,2	24,6	26,28
15% 45 días	0,91	5,3E-08	4,85E-08	0,0	45,4	45,44
30% 15 días	0,87	6,5E-08	5,62E-08	4,4	33,9	36,81
30% 45 días	0,89	5,2E-08	4,61E-08	2,2	47,0	48,20

La Tabla 31, hace referencia a los porcentajes de variación en la permeabilidad de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 y 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), se observa un gran porcentaje de variación en los resultados correspondientes al  $K_{20}$ . En general los índices de  $n_T/n_{20}$  no tuvieron una variación significativa en sus resultados. En las columnas  $K_T$  y  $K_{20}$ , se evidencia resultados de variación del porcentaje con respecto a la muestra (S0) de forma ascendentes, al observar la Figura 43, se evidencia que dichas variaciones corresponden a disminución en las velocidades del caudal, es decir

que disminuyó el flujo por lo tanto también disminuyó la permeabilidad, haciéndose así mismo más impermeable el suelo al adicionarle crudo.

En la Figura 43, se pueden observar los resultados de permeabilidad correspondientes a los 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 43. Resultados Permeabilidad de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.**



El análisis de resultados correspondiente al ensayo de Permeabilidad de los suelos se realizó con base a las Figuras 41, 42 y 43, en las cuales se observan variaciones en los índices. La Figura 43 evidencia un cambio de orden descendente en la permeabilidad. Se comparó el suelo tipo (S0) correspondiente al no contaminado, con el suelo (S8) correspondiente al de mayor contaminación (30%) con crudo y tiempo expuesto al mismo (45 días), donde se presentó un cambio de 0.91 a 0.89 respectivamente. Los cálculos pertinentes al ensayo de permeabilidad se encuentran de forma mas detallada en el Anexo E.

Estos dos tipos de suelos se constituyen como los dos límites del estudio (el primer suelo tipo de suelo tratado (S0), y el último con la mayor contaminación y tiempos de exposición al crudo), aunque se observa un descenso en la cifras de  $n_T/n_{20}$ , en los dos extremos del estudio, a lo largo de los ensayos se presentaron alzas y bajas como se evidencia en un esquema más general, es decir el material se presentó una mayor permeabilidad debido a la contaminación por crudo y el paso de los plazos estipulados (15 y 45 días) como se evidencia en la Figura 43.

## 5.6 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE

**5.6.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de resistencia al corte de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 32, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 32 Porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

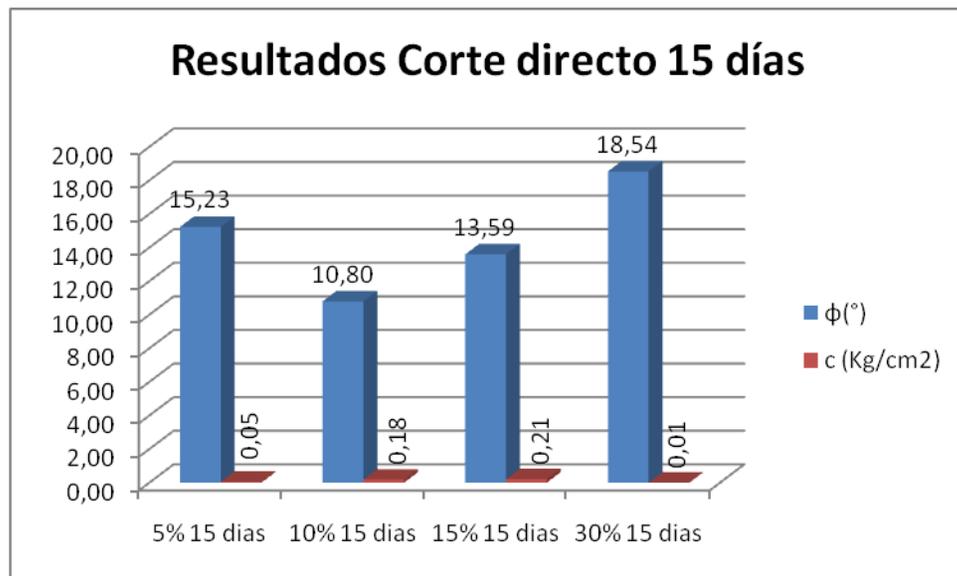
Tipo de suelo	Resultados		% de variación con respecto a la muestra (S0)	
	$\varphi(^{\circ})$	c (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\varphi(^{\circ})$	c (Kg/cm <sup>2</sup> )
-				
No contaminado	16,96	0,07	-	-
5% 15 días	15,23	0,05	10,2	29,9
10% 15 días	10,80	0,18	36,3	155,3
15% 15 días	13,59	0,21	19,9	191,2
30% 15 días	18,54	0,01	9,3	89,6

La Tabla 32, hace referencia a los porcentajes de variación en la resistencia al corte de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de

suelo no contaminada (S0), encontrándose que el suelo tipo (S3), presentó la mayor variación en el ángulo de fricción  $\phi(^{\circ})$ , presentando una diferencia del 36,3% con respecto al ángulo de la muestra de suelo tipo (S0). Por otro lado, la cohesión de los suelos presentó variaciones más altas que las correspondientes a los ángulos de fricción, destacándose la muestra de suelo tipo (S5), con una variación en la cohesión con respecto al suelo no contaminado (S0) de 191.2%.

En la Figura 44, se pueden observar los resultados de resistencia al corte correspondientes a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 44. Resultados Resistencia al corte de los suelos a los 15 días de contaminación.**



**5.6.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de resistencia al corte de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 33, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

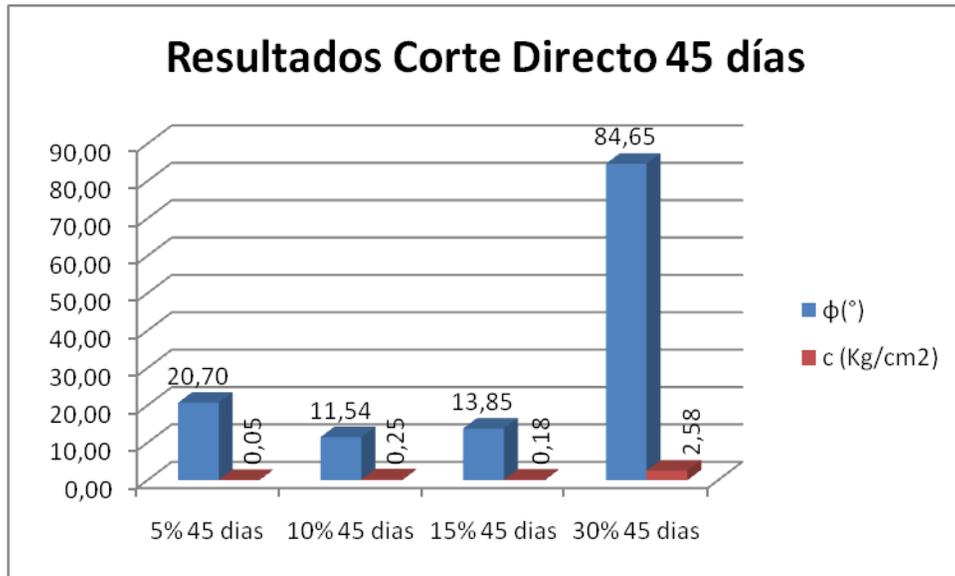
**Tabla 33 porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días**

Tipo de suelo	Resultados		% de variación con respecto a la muestra (S0)	
	$\varphi(^{\circ})$	c (Kg/cm2)	$\varphi(^{\circ})$	c (Kg/cm2)
-				
No contaminado	16,96	0,07	-	-
5% 45 días	20,70	0,05	22,0	23,9
10% 45 días	11,54	0,25	32,0	244,9
15% 45 días	13,85	0,18	18,3	155,3
30% 45 días	84,65	2,58	399,1	3526,7

La Tabla 33, hace referencia a los porcentajes de variación en la resistencia al corte de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0); se observa una gran variación en el ángulo de fricción y cohesión, correspondiente a la muestra de suelo tipo (S8), vale la pena destacar que este ensayo fue el único realizado por medio de la máquina de corte manual pudiendo afectar la precisión de los resultados.

En la Figura 45, se pueden observar los resultados de resistencia al corte correspondientes a los 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 45. Resultados Resistencia al corte de los suelos a los 45 días de contaminación.



**5.6.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados de resistencia al corte de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 34, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

Tabla 34 porcentajes de Variación de los resultados en la resistencia al corte partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días

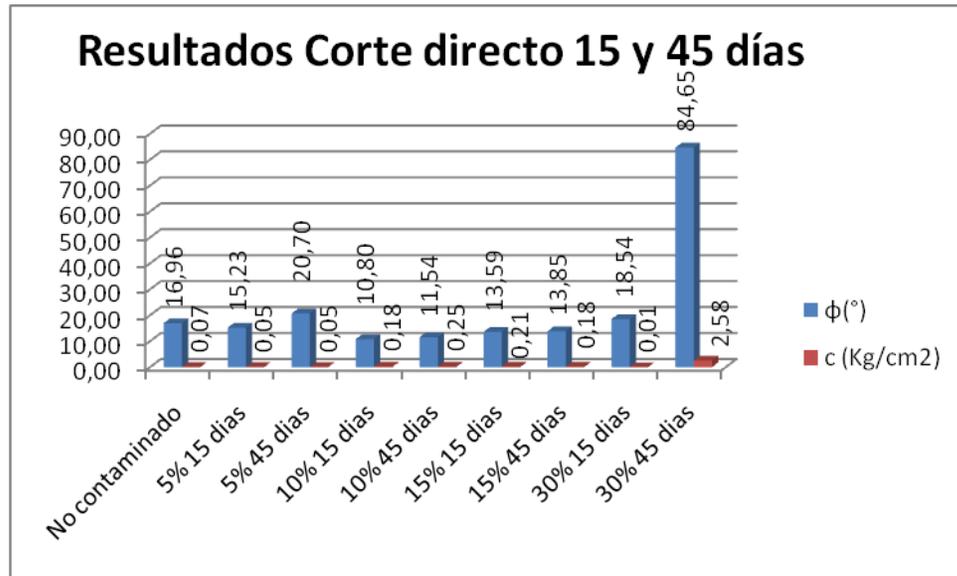
Tipo de suelo	Resultados		% de variación con respecto a la muestra (S0)	
	$\phi$ (°)	c (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	c (Kg/cm <sup>2</sup> )
-				

No contaminado	16,96	0,07	-	-
5% 15 días	15,23	0,05	10,2	29,9
5% 45 días	20,70	0,05	22,0	23,9
10% 15 días	10,80	0,18	36,3	155,3
10% 45 días	11,54	0,25	32,0	244,9
15% 15 días	13,59	0,21	19,9	191,2
15% 45 días	13,85	0,18	18,3	155,3
30% 15 días	18,54	0,01	9,3	89,6
30% 45 días	84,65	2,58	399,1	3526,7

La Tabla 34, hace referencia a los porcentajes de variación en la resistencia al corte de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 y 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), desde un punto de vista más general, y excluyendo los resultados arrojados por la muestra de suelo tipo (S8), los valores correspondientes al ángulo de fricción  $\phi(^{\circ})$  y cohesión  $c$  (Kg/cm<sup>2</sup>) de las diferentes muestras de suelos presentan variaciones con respecto a la muestra de suelo tipo (S0), en las primeras muestras de suelos (S1,S2,S3) asciende la diferencia entre los resultados, posteriormente desciende, es decir, de nuevo se acercan a los valores arrojados por el suelo no contaminado (S0).

En la Figura 46, se pueden observar los resultados de resistencia al corte correspondientes a los 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

Figura 46. Resultados Resistencia al corte de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.



El análisis de resultados correspondiente al ensayo de “determinación de la resistencia al corte” se realizó con base a las Figuras 44, 45 y 46. En la Figura 44, correspondiente a los resultados obtenidos a los 15 días posteriores de la contaminación con crudo, se presenta un aumento en el Angulo de fricción; por otro lado la cohesión varía con el pico máximo en la muestra de suelo tipo (S5), con un 0.21.

La Figura 45, evidencia resultados variables con un gran incremento en el Angulo de fricción en la muestra de suelo tipo (S8), dicho comportamiento puede atribuirse al cambio de la máquina de corte donde fue realizado el ensayo, ya que en el laboratorio de suelos de la universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, se averió la máquina de corte digital, por lo que se vió en la necesidad de realizar el último ensayo del estudio (S8) en la máquina manual, pudiendo afectar la precisión de los resultados.

En un plano más general, como el que brinda la Figura 46, se observa cambios en el ángulo de fricción y la cohesión, comparando los resultados con el tipo de suelo (S0) con un 16.96 en el ángulo, se genera un aumento posteriormente en el tipo

de suelo (S2), consecutivamente el ángulo disminuye y vuelve a aumentar, en general el ángulo de fricción  $\phi(^{\circ})$ , aumento a medida que se aumentaba el porcentaje de contaminación con crudo y el tiempo de exposición del suelo al mismo. Por otro lado la cohesión decayó como se evidencia en la muestra de suelo tipo (S7), la cual presento una cohesión de  $0,01 \text{ Kg/cm}^2$ , mientras que la cohesión presente en la muestra de suelo tipo (S0) fue  $0,07 \text{ Kg/cm}^2$ . Los cálculos pertinentes al ensayo de resistencia al Corte se encuentran de forma mas detallada en el Anexo F.

A continuación se presentan los valores típicos en los ángulos de fricción (Tabla 35):

**Tabla 35 Valores típicos de ángulos de fricción**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Grados</b>
<b>Arenas :</b>	
Suelta	27-30
Media	30-35
Densa	35-38
<b>Gravas con algo de arena</b>	34-48
<b>Limos</b>	26-35

Fuente [35]

Según las características del suelo de clasifican en[35]:

- **Arcillas**, presentan elevada cohesión y ángulos de fricción interna.
- **Limos**, presentan valores moderados de cohesión y ángulos de fricción interna.
- **Arenas**, presentan pequeños valores de cohesión casi que cero y ángulos de fricción elevadas.

En la Figura 46, se observan los pequeños valores de cohesión muy cercanos a cero lo cual clasifica las muestras como arenas, sin embargo para ser catalogadas de esta manera, tienen que presentarse ángulos de fricción elevados. En este estudio dichos ángulos presentan valores moderados.

## **5.7 CON RESPECTO A LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS**

Los ensayos de consolidación unidimensional se realizaron con cargas de 0.5, 1, 2 y 4 Kg/cm<sup>2</sup>, las Figuras muestran los coeficientes de consolidación (CV) versus los resultados obtenidos de cada ensayo en las diferentes cargas, agrupados por el tipo de porcentaje de contaminación y tiempo de exposición al mismo.

Por inconvenientes relacionados con los tiempos de exposición de las muestras de suelos al crudo, los ensayos correspondientes al 15% 15 días y 30% 15 días no fueron realizados.

**5.7.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de Consolidación unidimensional de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 36, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 36 porcentajes de Variación de los resultados de consolidación unidimensional partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

<b>Comparación de la Variación de los resultados en % con respecto a la muestra de suelo (S0)</b>								
-	<b>0,5 KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>1 KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>2 KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>4 KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>4- 2KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>2- 1KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>1- 0,5KG/cm<sup>2</sup></b>	<b>0,5- 0KG/cm<sup>2</sup></b>
No contaminado	2,12E-05	4,16E-05	9,88E-05	6,72E-04	1,71E-03	1,37E-03	8,75E-04	1,54E-03
5% 15 días	6,86E-05	7,37E-05	2,39E-04	7,90E-04	3,62E-03	1,74E-03	1,50E-03	2,46E-03
10% 15 días	7,31E-05	1,26E-04	3,70E-04	9,87E-04	1,99E-03	3,78E-03	3,55E-03	2,86E-03
<b>% de Variación con respecto al tipo (S0)</b>								
5% 15 días	224,06	77,05	142,26	17,49	111,80	27,07	71,71	60,22
10% 15 días	245,47	202,64	274,55	46,83	16,53	177,00	306,08	86,15

La Tabla 36, hace referencia a los porcentajes de variación de la consolidación unidimensional de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0). En la Tabla se observa los resultados generados por cada una de las cargas y descargas realizadas, se evidencia claramente una mayor variación en porcentaje, de los resultados obtenidos en la carga correspondiente a 0,5 Kg/cm<sup>2</sup>, donde las muestras de suelo tipo (S1) y (S3)

presentan una variación de 224,06 y 245,47 por ciento, respectivamente; posteriormente, se puede observar que los porcentajes de variación disminuyen a medida que se aumenta la carga y se comienzan los ciclos de descarga, es decir los datos presentan una mayor dispersión con respecto a los de la muestra ( $S_o$ ) en los primeros ciclos de carga del ensayo; posteriormente disminuyen significativamente cuando se llega a los ciclos de descarga, con lo cual se evidencia una mayor variación en los resultados, debido a la contaminación con crudo en los primeros ciclos del ensayo; también se observan mayores variaciones en los resultados de estos primeros ciclos de carga, en las muestras con tipos de contaminación de 45 días.

A continuación en la Figura 47, se presentan los resultados de consolidación unidimensional de los suelos correspondientes a los 15 días posteriores a la contaminación con crudo, se observa los coeficientes de consolidación obtenidos versus las cargas y descargas realizadas a cada ensayo, estas cargas así mismo presentan agrupaciones de los diferentes tipos de suelo.

**Figura 47. Resultados Consolidación de los suelos a los 15 días de contaminación.**



**5.7.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados de Consolidación unidimensional de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 37, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras **de 45 días posteriores a la contaminación.**

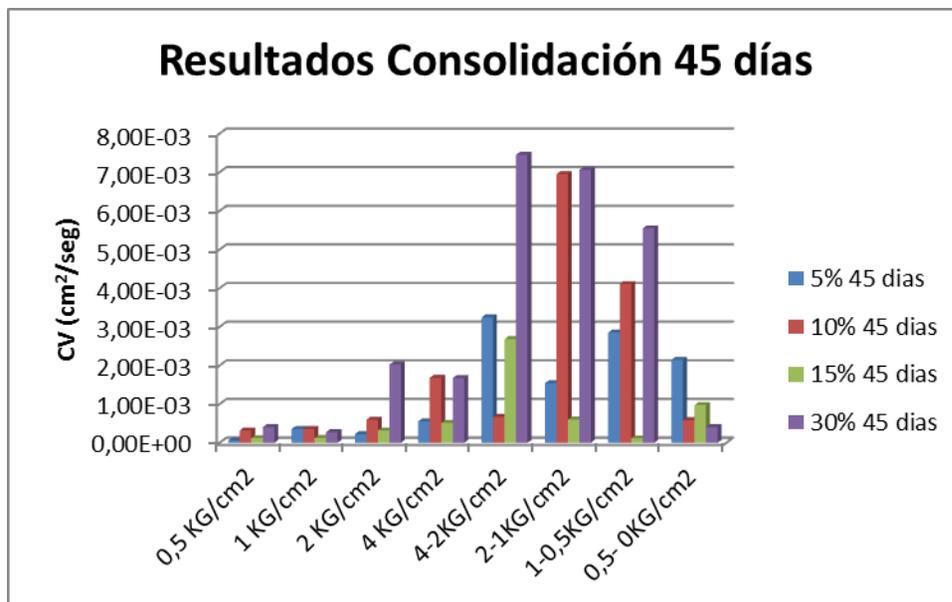
**Tabla 37 Porcentajes de Variación de los resultados de consolidación unidimensional partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días**

<b>Comparación de la Variación de los resultados en % con respecto a la muestra de suelo (S0)</b>								
-	0,5 KG/cm <sup>2</sup>	1 KG/cm <sup>2</sup>	2 KG/cm <sup>2</sup>	4 KG/cm <sup>2</sup>	4-2KG/cm <sup>2</sup>	2-1KG/cm <sup>2</sup>	1-0,5KG/cm <sup>2</sup>	0,5- 0KG/cm <sup>2</sup>
No contaminado	<b>2,12E-05</b>	<b>4,16E-05</b>	<b>9,88E-05</b>	<b>6,72E-04</b>	<b>1,71E-03</b>	<b>1,37E-03</b>	<b>8,75E-04</b>	<b>1,54E-03</b>
5% 45 días	5,98E-05	3,59E-04	2,23E-04	5,56E-04	3,24E-03	1,54E-03	2,85E-03	2,15E-03
10% 45 días	3,19E-04	3,54E-04	6,00E-04	1,68E-03	6,67E-04	6,95E-03	4,11E-03	5,85E-04
15% 45 días	1,19E-04	1,25E-04	3,21E-04	5,11E-04	2,68E-03	6,02E-04	1,14E-04	9,75E-04
30% 45 días	4,06E-04	2,75E-04	2,03E-03	1,67E-03	7,45E-03	7,06E-03	5,55E-03	4,06E-04
<b>% de Variación con respecto al tipo (S0)</b>								
5% 45 días	182,42	762,58	125,52	17,34	89,66	12,84	225,91	39,61
10% 45 días	1409,02	751,17	506,91	150,16	61,00	408,80	368,98	61,92
15% 45 días	459,92	199,39	224,37	24,06	56,91	55,93	86,92	36,62
30% 45 días	1818,07	560,13	1950,27	148,71	335,63	417,39	533,59	73,57

La Tabla 37, hace referencia a los porcentajes de variación de la consolidación unidimensional de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), se observan porcentajes de variación de los resultados del coeficiente de consolidación (CV) mayores que los presentados en la Tabla 36, lo que demuestra una gran incidencia de la contaminación, no solo por el porcentaje de crudo, sino también por el tiempo de exposición al mismo.

A continuación en la Figura 48, se presentan los resultados de consolidación unidimensional de los suelos correspondientes a los 45 días posteriores a la contaminación con crudo, se observa los coeficientes de consolidación obtenidos versus las cargas y descargas realizadas a cada ensayo, estas cargas así mismo presentan agrupaciones de los diferentes tipos de suelo.

**Figura 48. Resultados Consolidación de los suelos a los 45 días de contaminación**



**5.7.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados de Consolidación unidimensional de los suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La Tabla 38, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

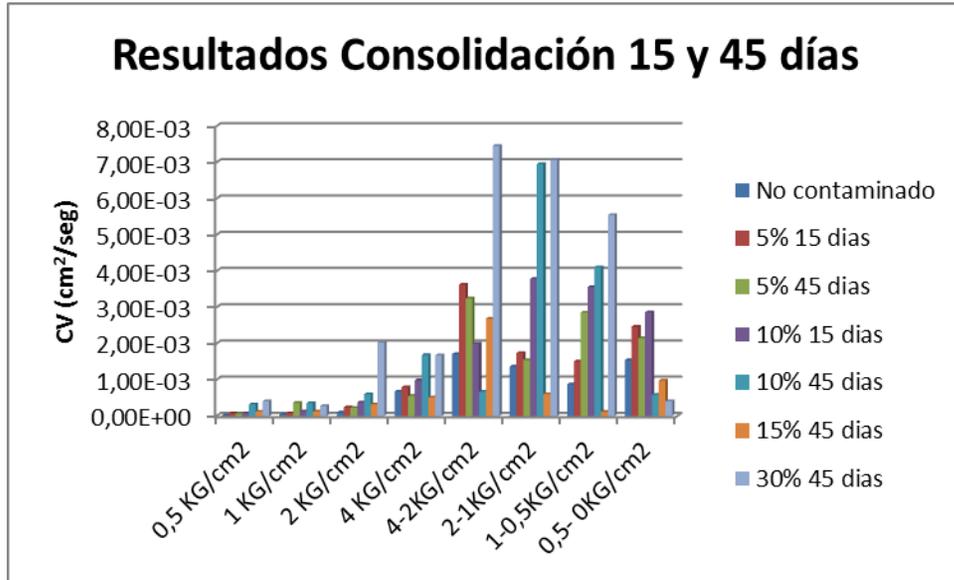
**Tabla 38 porcentajes de Variación de los resultados de consolidación unidimensional partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días**

Comparación de la Variación de los resultados en % con respecto a la muestra de suelo (S0)								
-	0,5 KG/cm <sup>2</sup>	1 KG/cm <sup>2</sup>	2 KG/cm <sup>2</sup>	4 KG/cm <sup>2</sup>	4-2KG/cm <sup>2</sup>	2-1KG/cm <sup>2</sup>	1-0,5KG/cm <sup>2</sup>	0,5- 0KG/cm <sup>2</sup>
No contaminado	<b>2,12E-05</b>	<b>4,16E-05</b>	<b>9,88E-05</b>	<b>6,72E-04</b>	<b>1,71E-03</b>	<b>1,37E-03</b>	<b>8,75E-04</b>	<b>1,54E-03</b>
5% 15 días	6,86E-05	7,37E-05	2,39E-04	7,90E-04	3,62E-03	1,74E-03	1,50E-03	2,46E-03
5% 45 días	5,98E-05	3,59E-04	2,23E-04	5,56E-04	3,24E-03	1,54E-03	2,85E-03	2,15E-03
10% 15 días	7,31E-05	1,26E-04	3,70E-04	9,87E-04	1,99E-03	3,78E-03	3,55E-03	2,86E-03
10% 45 días	3,19E-04	3,54E-04	6,00E-04	1,68E-03	6,67E-04	6,95E-03	4,11E-03	5,85E-04
15% 45 días	1,19E-04	1,25E-04	3,21E-04	5,11E-04	2,68E-03	6,02E-04	1,14E-04	9,75E-04
30% 45 días	4,06E-04	2,75E-04	2,03E-03	1,67E-03	7,45E-03	7,06E-03	5,55E-03	4,06E-04
% de Variación con respecto al tipo (S0)								
5% 15 días	224,06	77,05	142,26	17,49	111,80	27,07	71,71	60,22
5% 45 días	182,42	762,58	125,52	17,34	89,66	12,84	225,91	39,61
10% 15 días	245,47	202,64	274,55	46,83	16,53	177,00	306,08	86,15
10% 45 días	1409,02	751,17	506,91	150,16	61,00	408,80	368,98	61,92
15% 45 días	459,92	199,39	224,37	24,06	56,91	55,93	86,92	36,62
30% 45 días	1818,07	560,13	1950,27	148,71	335,63	417,39	533,59	73,57

La Tabla 38, hace referencia a los porcentajes de variación de la consolidación unidimensional de los suelos, correspondiente a los ensayos realizados 15 y 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), en un plano más general se destacan con los porcentajes de variación más altos los correspondientes a los ensayos realizados a los 45 días posteriores a la contaminación lo que corrobora la incidencia que tiene el tiempo de exposición de las muestras al crudo en los resultados obtenidos. Vale la pena destacar las variaciones porcentuales elevadas, presentes en los coeficientes de consolidación (CV) correspondientes a la muestra de suelo (S8), esta muestra fue la que generó más cantidad de hongos blancos. Los cálculos pertinentes al ensayo de Consolidación unidimensional se encuentran de forma mas detallada en el Anexo G.

A continuación en la Figura 49, se presentan los resultados de consolidación unidimensional de los suelos correspondientes a los 15 y 45 días posteriores a la contaminación con crudo. Se observa los coeficientes de consolidación obtenidos versus las cargas y descargas realizadas a cada ensayo, estas cargas así mismo presentan agrupaciones de los diferentes tipos de suelo.

Figura 49. Resultados Consolidación de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.



## 5.8 CON RESPECTO AL ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN (PRÓCTOR MODIFICADO)

**5.8.1 Resultados a los 15 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del ensayo modificado de compactación de suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 39, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 días posteriores a la contaminación.

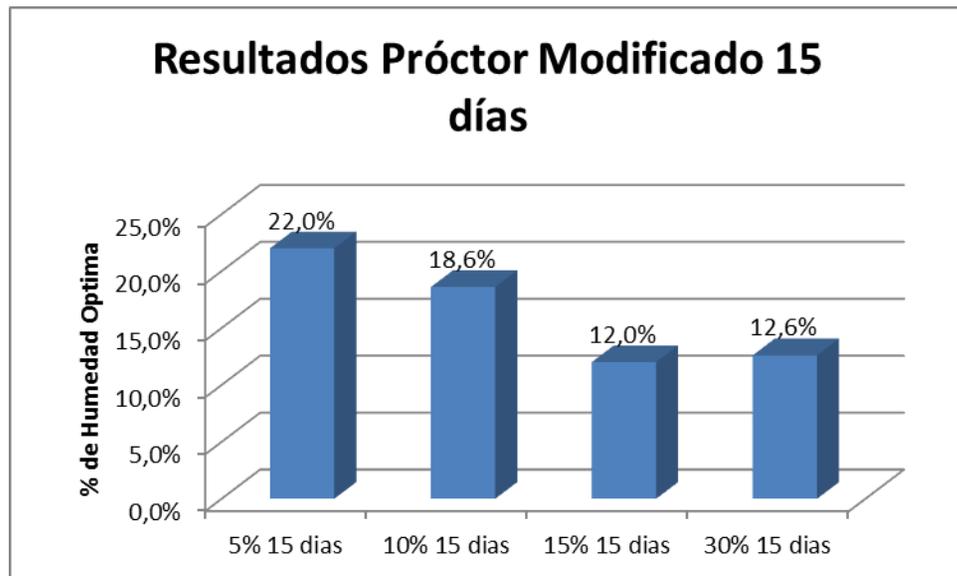
**Tabla 39 porcentajes de Variación del ensayo modificado de compactación, partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>% de Humedad Óptima</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	22,9	-
5% 15 días	22	3,93
10% 15 días	18,6	18,78
15% 15 días	12	47,60
30% 15 días	12,6	44,98

La Tabla 39, hace referencia a los porcentajes de variación del ensayo modificado de compactación de los suelos, correspondiente a las pruebas hechas 15 después de la contaminación, se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0). Se observa claramente el aumento secuencial en la variación de los resultados a medida que aumenta la contaminación con crudo y el tiempo de exposición del suelo a este, es decir entre más porcentaje de contaminación tuvo el suelo, la humedad óptima se alejó más a la del suelo no contaminado tipo (S0).

En la Figura 50, se pueden observar los resultados del ensayo modificado de compactación, correspondientes 15 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 50. Resultados Compactación (Próctor) de los suelos a los 15 días de contaminación.**



**5.8.2 Resultados a los 45 días de contaminado.** Se realizó el análisis de los resultados del ensayo modificado de compactación de suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La Tabla 40, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 45 días posteriores a la contaminación.

**Tabla 40 porcentajes de Variación del ensayo modificado de compactación, partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 45 días**

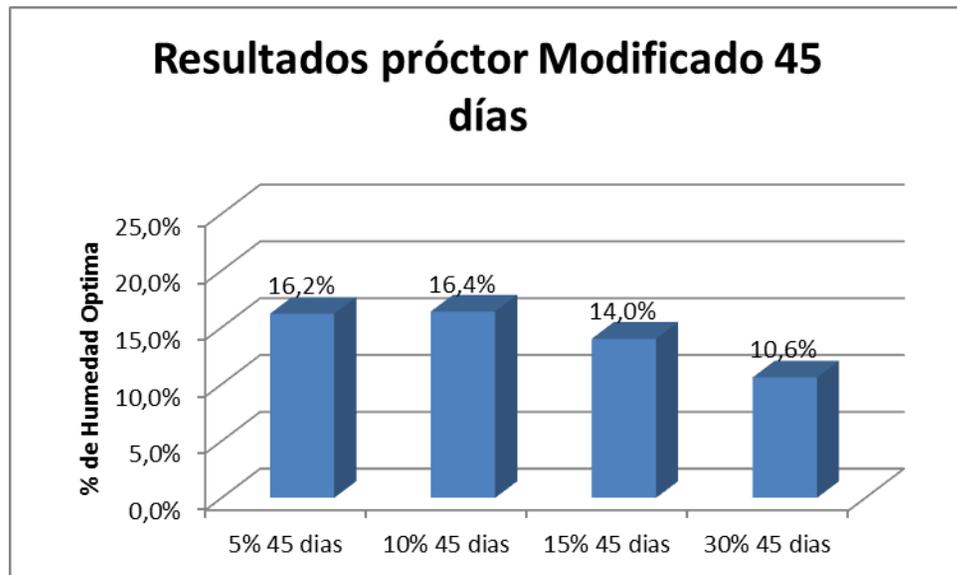
Tipo de suelo	% de Humedad Óptima	% de variación con respecto a la muestra (S0)
No contaminado	22,9	-
5% 45 días	16,2	29,26
10% 45 días	16,4	28,38
15% 45 días	14	38,86
30% 45 días	10,6	53,71

La Tabla 40, hace referencia a los porcentajes de variación del ensayo modificado de compactación de los suelos, correspondiente a las pruebas hechas 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo

de la muestra de suelo no contaminada (S0), se observa el de la variación de los resultados de forma ascendente, entre más contaminación tuvo la muestra de suelo, de la misma forma su humedad óptima de alejo más a la de la muestra no contaminada (S0).

En la Figura 51, se pueden observar los resultados del ensayo modificado de compactación, correspondientes 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 51. Resultados Compactación (Próctor) de los suelos a los 45 días de contaminación.**



**5.8.3 Resultados a los 15 y 45 días de contaminación.** Se realizó el análisis de los resultados del ensayo modificado de compactación de suelos por medio de una comparación partiendo del suelo No contaminado tipo (S0). La siguiente Tabla 41, contiene los porcentajes de variación en los resultados para las muestras de 15 y 45 días posteriores a la contaminación.

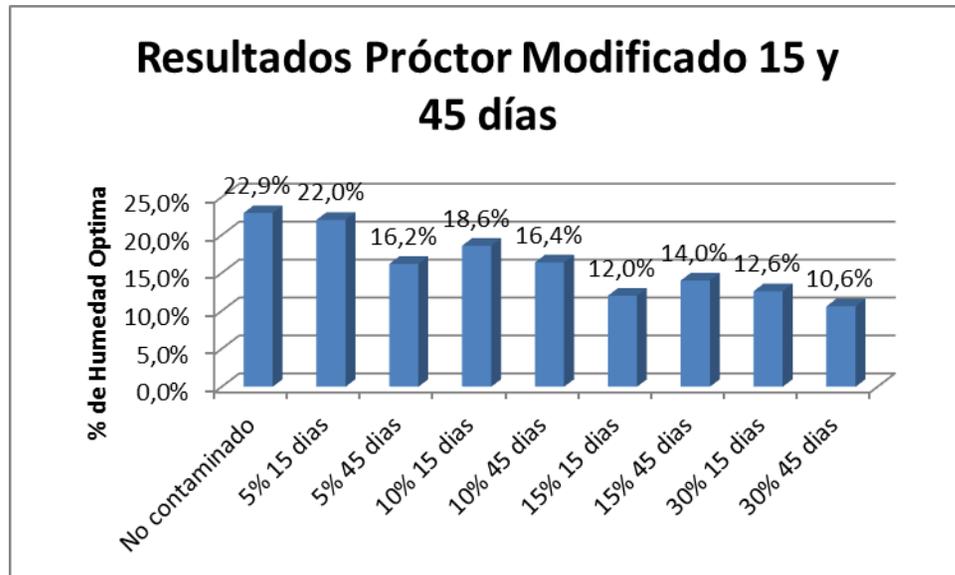
**Tabla 41 porcentajes de Variación del ensayo modificado de compactación, partiendo del suelo (S0) para las muestras de suelo a los 15 y 45 días**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>% de Humedad Óptima</b>	<b>% de variación con respecto a la muestra (S0)</b>
No contaminado	22,9	-
5% 15 días	22,0	3,93
5% 45 días	16,2	29,26
10% 15 días	18,6	18,78
10% 45 días	16,4	28,38
15% 15 días	12,0	47,60
15% 45 días	14,0	38,86
30% 15 días	12,6	44,98
30% 45 días	10,6	53,71

La Tabla 41, hace referencia a los porcentajes de variación del ensayo modificado de compactación de los suelos, correspondiente a las pruebas hechas 15 y 45 después de la contaminación. Se realizó un análisis comparativo partiendo de la muestra de suelo no contaminada (S0), se observa en un plano más general los cambios en los resultados. Se hace evidente que la variación con respecto a la muestra (S0), aumenta a medida que el porcentaje de contaminación y el tiempo se incrementan.

En la Figura 52, se pueden observar los resultados del ensayo modificado de compactación, correspondientes 15 y 45 días posteriores de la contaminación con crudo de forma gráfica.

**Figura 52. Resultados Compactación (Próctor) de los suelos a los 15 y 45 días de contaminación.**



El análisis de resultados correspondiente a los ensayos modificados de compactación se realizó con base a las Figuras 50, 51 y 52. La Figura 50, correspondiente a los datos obtenidos a los 15 días posteriores a la contaminación con crudo evidencia un descenso en la humedad óptima del suelo a medida que se aumentó el porcentaje de contaminación y el tiempo de exposición del suelo al crudo. La Figura 51, también muestra un descenso en los valores de humedad óptima del suelo a los 45 días de realizada la contaminación. Los cálculos pertinentes al ensayo modificado de compactación se encuentran de forma mas detallada en el Anexo H.

En un esquema más general como el que evidencia en la Figura 52, 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.

**Tabla 42 valores típicos de humedad óptima de los suelos**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>
Arcilloso	20-30
Limo-Arcilloso	15-20
Areno-Arcilloso	8-15

Fuente [36]

Según la Tabla 42, la muestra de suelo (S0) inicia con una humedad óptima correspondiente a las arcillas. Posteriormente desciende pasando por los limos arcillosos y finaliza con la muestra de suelo tipo (S8), con una humedad óptima perteneciente a las arenas arcillosas. Lo anteriormente nombrado indica una alta influencia del crudo y el tiempo de exposición al mismo, variando el porcentaje de humedad óptima del suelo orgánico utilizado en el estudio. La reacción que genera la contaminación tiende a disminuir la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance su máxima compactación. Este fenómeno se le atribuye al crudo y a la saturación que este le produce al suelo.

## 5.9 CON RESPECTO AL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO

### 5.9.1 Resultado Análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado (S0).

Figura 53 Resultado Análisis granulométrico de la muestra de suelo no contaminado

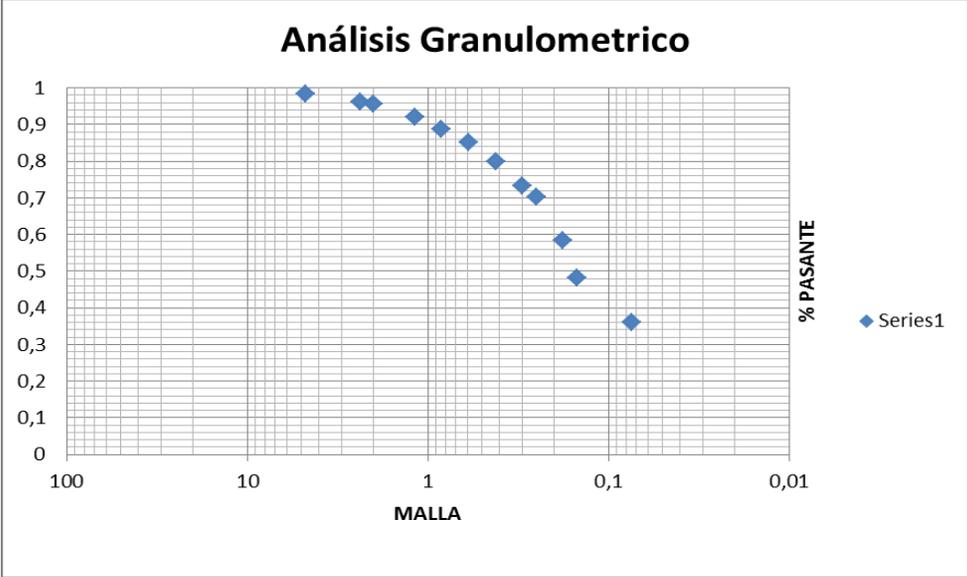


Tabla 43 Resultado de análisis granulométrico por tamices

GRANULOMETRIA POR MALLAS				
Malla No	Peso suelo retenido gr	Porciento ret. Parcial %	% Acumulado	
			Retenido	Pasante
4	25,8	1,66%	1,66%	98,34%
8	34,4	2,21%	3,87%	96,13%
10	8,2	0,53%	4,40%	95,60%
16	56,2	3,62%	8,02%	91,98%
20	52,2	3,36%	11,38%	88,62%
30	52,4	3,37%	14,75%	85,25%
40	84,4	5,43%	20,18%	79,82%
50	102,2	6,58%	26,75%	73,25%
60	45	2,90%	29,65%	70,35%
80	187	12,03%	41,68%	58,32%
100	155,8	10,02%	51,71%	48,29%
200	188,6	12,13%	63,84%	36,16%
Fondo	562	36,16%	100,00%	0,00%
Total	1554,2	100,00%		

El análisis granulométrico arrojó los siguientes porcentajes: Grava: 1,66%, Finos: 36,16% y Arenas 62,18%.

Con base en la Figura 2 y la Tabla 43, se analizó la granulometría de la muestra de suelo (S0), el resultado arrojado fue una arena SC-SM, la Figura también evidencia la necesidad de encontrar el límite líquido y el índice de plasticidad hallado anteriormente en el numeral 5.2.

El suelo se clasifica como una SC arena arcillosa, este comportamiento puede atribuirse al contenido del 40% de SC que se le adicionó al abono orgánico, sin embargo el límite plástico e índice de plasticidad arroja un resultado de clasificación OL (suelo orgánico de baja plasticidad), sumándole a esto una inspección visual donde el suelo es de color negro, su textura es fibrosa, una

colorimetría de más del 5 y un contenido de materia orgánica de 22% el suelo se clasifica como orgánico.

#### **5.10 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO EN SUELOS MEDIANTE PÉRDIDA POR IGNICIÓN**

El ensayo de contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición arrojó un resultado del 22%. El cual indica un alto porcentaje de material orgánico presente el suelo.

#### **5.11 CON RESPECTO A LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO EN SUELOS MEDIANTE COLORIMETRÍA**

El resultado del ensayo de contenido de material por colorimetría fue más de 5.

En la Tabla de colores el asignado como número 5, se constituye como el más alto, entre más oscura se torne la solución, el suelo contiene más materia orgánica, al arrojar como resultado más de 5, se evidencia que la muestra de suelos (S0) es altamente orgánica.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se lograron identificar las variaciones en las propiedades mecánicas de los suelos afectados por derrames de crudo en porcentaje en peso de 5, 10, 15 y 30 con crudo suministrado por Ecopetrol en febrero del 2011.

Respecto al ensayo de Gravedad Específica de los suelos

- Se evidencian variaciones en el peso específico de los suelos, comprobando la incidencia del crudo dentro de las propiedades del suelo relacionadas con el peso específico de los mismos. Las muestras de suelo tipo (S4) y (S5), presentan los resultados del peso específico más altos, con un 2,11 y 2,09 ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) respectivamente. Posteriormente los valores descienden. Los resultados del estudio permiten inferir que concentraciones mayores al 15 % empiezan a generar disminución del peso específico en suelos afectados por derrame de crudo, luego de 45 días.

Respecto al ensayo del límite líquido de los suelos

- El límite líquido de los suelos contaminados presentó variaciones pequeñas en sus resultados, pudieron ser causadas por las diferentes concentraciones de crudo y tiempos de exposición al mismo.
- Los resultados varían sin ninguna tendencia exacta, sin embargo los cambios encontrados no superan el rango permitido por la norma INV E-125 correspondiente a una variación máxima del 13 por ciento entre dos resultados del mismo ensayo, lo que indica que dichos porcentajes de variación pueden atribuírsele tanto a la contaminación como al rango de precisión entre dos resultados permitidos por la norma.

- Con base en la carta de plasticidad y teniendo los resultados de límite líquido e índice de plasticidad de los suelos se clasificó el suelo en su mayoría como (OL) orgánicos de baja plasticidad. Por otra parte los suelos tipo (S3, S4 S6 Y S7), se clasificaron como (CH) arcillas de alta plasticidad, no obstante estos últimos encuentran muy cercanos a la línea A, la cual los separa de los suelos tipo OL.
- Se observó la clasificación de los diferentes tipos de suelo, los cuales se constituyen en su mayoría como (OL) orgánicos de baja plasticidad. En el caso de los suelos (S3, S4 S6 Y S7) se presentan como (CH) arcilla de alta plasticidad, sin embargo estos últimos se encuentran muy cercanos a la línea A, la cual los separa de los suelos tipo OL.

Respecto al ensayo del límite plástico de los suelos

- La plasticidad de los suelos contaminados creció con respecto al tipo de suelo (S0), generándose un aumento significativo en el suelo tipo (S8).
- Es importante destacar el aumento significativo en la variación del material tipo (S8) correspondiente a la contaminación y tiempo de exposición mas altos al crudo con un 29.07% de variación. Dicho comportamiento puede atribuírsele a la gran cantidad de saturación con del suelo, el cual presento hongos de color blanco (la contaminación correspondiente al 30% de crudo fue la única que genero hogos en el suelo).
- Según la Norma INV E-126, para los suelos que presenten un límite plástico entre 15 y 32 porciento, los cuales hayan sido realizados por diferentes operadores, no deben diferir dos resultados entre si en mas de un 18% de su promedio. En los resultados arrojados del límite plástico en las diferentes

muestras de suelos, todos se encontraron por dentro del rango de la norma, vale la pena destacar que al comparar dos resultados de la misma contaminación ninguno excedió el rango máximo de tolerancia entre los dos del 18%.

- Se destaca un aumento significativo en la variación del material tipo (S8) correspondiente a la contaminación y tiempo de exposición más altos al crudo con un 29.07% de variación. Dicho comportamiento puede atribuírsele a la gran cantidad de saturación del suelo, el cual presentó hongos de color blanco (la contaminación correspondiente al 30% de crudo fue la única que generó hongos en el suelo).

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

- Se destaca el aumento generado en las muestras causado por la contaminación por medio de crudo, en los diferentes porcentajes y tiempos. Por otra parte, los resultados correspondientes a la relación de contracción también varían con respecto a la muestra de suelo no contaminada (S0), aunque en menor proporción.
- Según las variaciones correspondientes a los límites de contracción, se destaca la tendencia descendente en los resultados del límite de contracción, el suelo de tipo no contaminado (S0) presentó un 19,89% de límite de contracción, mientras que el tipo (S8) arrojó un 16,53%.
- La relación de contracción presentó variaciones en los resultados con respecto a los del suelo tipo (S0), es importante destacar que dichas variaciones fueron inferiores a las presentadas por el límite de contracción, lo que indica una mayor incidencia de la contaminación con crudo y el tiempo de exposición al mismo en los límites de contracción.

Respecto al ensayo de permeabilidad se los suelos

- Dentro de los resultados de variación, se observan los mayores porcentajes de cambio, con respecto al suelo tipo (S0), en la columna  $K_{20}$ , la cual presenta en la muestra de suelo tipo (S7), un 36,8% de variación,  $n_T/n_{20}$  evidencia la menor variación de los resultados en la muestra tipo (S7) con un 4,4 %. Por otro lado  $K_T$  muestra un cambio con respecto al suelo no contaminado de 33,9% en la muestra (S7).
- Los índices de  $n_T/n_{20}$  no presentaron variaciones significativas, en las columnas  $K_T$  y  $K_{20}$ , se evidencia resultados de variación del porcentaje con respecto a la muestra (S0) de forma ascendentes. Se evidencia que dichas variaciones corresponden a disminución en las velocidades del caudal, es decir que disminuyó el flujo por lo tanto también disminuyó la permeabilidad, haciéndose así mismo más impermeable el suelo al adicionarle crudo.

Respecto a la determinación de la resistencia al corte

- Los valores correspondientes al ángulo de fricción  $\phi(^{\circ})$  y cohesión  $c$  ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) de las diferentes muestras de suelos presentan variaciones con respecto a la muestra de suelo tipo (S0), en las primeras muestras de suelos (S1,S2,S3) asciende la diferencia entre los resultados, posteriormente desciende, es decir, de nuevo se acercan a los valores arrojados por el suelo no contaminado (S0).
- Se evidencia resultados variables con un gran incremento en el Angulo de fricción en la muestra de suelo tipo (S8). Dicho comportamiento puede atribuirse al cambio de la máquina de corte donde fue realizado el ensayo.

- Se destacan los valores de cohesión muy cercanos a cero lo cual clasifica las muestras como arenas, sin embargo para ser catalogadas de esta manera, tienen que presentarse ángulos de fricción elevados, en este estudio dichos ángulos presentan valores moderados.

Con respecto a la consolidación unidimensional de los suelos

- Los resultados de los coeficientes de consolidación variaron de forma ascendente con los porcentajes de contaminación y tiempo de exposición al crudo, es decir entre más contaminación se presentaba de igual forma la variación aumentaba.
- Con respecto a los ciclos de carga, se presentó una mayor variación de los resultados con respecto a la muestra de suelo tipo (S0) en los primeros ciclos de carga, es decir la variación fue mayor en las cargas que en las descargas presentes en el ensayo.
- Es importante destacar que las variaciones porcentuales más elevadas se hicieron presente en los coeficientes de consolidación (CV) correspondientes a la muestra de suelo (S8), esta muestra fue la que generó más cantidad de hongos blancos.

Con respecto al ensayo modificado de compactación

- Se destacó 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.

- La reacción que genera la contaminación tiende a disminuir la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcance su máxima compactación, dicho fenómeno se le atribuye al crudo

En general

- Los estudios realizados a los suelos contaminados con crudo, contribuyen en información básica para proyectos posteriores de remediación, pensando en la conservación del medio ambiente.
- Las diferentes muestras de suelo se conservan almacenadas en tanque con el fin de servir como base en estudios posteriores de remediación y caracterización de suelos contaminados con crudo en mayores tiempos de reposo.

## 8. RECOMENDACIONES

- Por seguridad, las muestras de suelo contaminadas con crudo, no deben secarse al horno, por el contrario pueden dejarse al medio ambiente bajo el sol o utilizarse un secador de pelo, cubriéndolas previamente con una tela porosa que permia el paso del aire y mantenga el material en un solo lugar.
- Para realizar el ensayo de gravedad específica, es necesario mezclar cantidades pequeñas de suelos contaminado con agua y agitar vigorosamente, ya que si se introduce toda la muestra de suelo en un solo paso, este genera grumos impermeables de material y no se disuelve homogéneamente con el agua.
- El material de suelo contaminado con crudo, no debe secarse en estufa eléctrica ya que pierde la plasticidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] FOSTER,S ., Hirata, R., Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes. Lima; CEPIS; ago. 1991. 90 p.

[2] MARTI, C., Gonzales, B., Blanco, M., Rev Iberoam Micol, Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos, Madrid, 2004.

[3] [http://www.dinero.com/negocios/produccion-petroleo-colombia-aumento-169-2010\\_82158.aspx](http://www.dinero.com/negocios/produccion-petroleo-colombia-aumento-169-2010_82158.aspx), visitada el 10 de mayo de 2012.

[4] LAMBE, W., Whitman, R., Mecánica de suelos, instituto tecnológico de Massachusetts, Noriega editores pag19.

[5] Manual de laboratorio de suelos, escuela de ingenieros militares, Bogotá, 1989, capítulo 1.

[6] POLANCO Margarita, Mecánica de suelos, universidad del cauca.

[7] CRESPO Carlos, Mecánica de suelos y cimentaciones, Editorial limusa, cuarta edición, 1976-1980.

[8][http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/03\\_clases\\_catedra/clases\\_catedra\\_ms1/05\\_terzaghi\\_3.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf), visitada el 17 de mayo de 2012.

[9] Manual de laboratorio de Bowles

[10] BOHORQUEZ P., Cortes S., Evaluación de la capacidad de encapsulamiento de los hidrocarburos en un producto natural y su posterior biodegradación: El caso del crudo presente en el Jaguey ubicado en el pozo colorado, Tesis.

[11] SALAZAR B., PEREZ E., El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Colombiana de petróleos, 2001, 37P.

[12] Bis.

[13] SALAZAR B., Perez E., El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Colombiana de petróleos, 2001, 38P.

[14] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/perforacion-exploratoria.htm>, visitada el 22 de mayo de 2012.

[15] SALAZAR B., PEREZ E., El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Colombiana de petróleos, 2001, pp. 44-45.

[16] Muñoz N., Fernando S., generalidades sobre la exploración y explotación del petróleo, Julio 1992, 51P.

[17] Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica explotación de hidrocarburos desarrollados por petróleos de norte S.A, Departamento del Cesar, disponible en la red [http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_17592.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_17592.pdf), consultado 8 de junio de 2012.

[18] El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Empresa Colombiana de petróleos, 2001, 61P.

[19] <http://ingenieria-de-petroleo.lacomunidadpetrolera.com/2008/09/la-exploracin-petrolera.html>, visitada el 10 de junio de 2012.

[20] <http://investigadoresgeofisica.com/metodos-geofisicos.php>, visitada el 11 de junio de 2012.

[21] [http://portalsigeo.adasistemas.com/html/informes/minerales/Met\\_19\\_Gravimetria\\_Caceres.pdf](http://portalsigeo.adasistemas.com/html/informes/minerales/Met_19_Gravimetria_Caceres.pdf), visitada el 12 de junio de 2012.

[22] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/produccion2.htm>, visitada el 13 de junio de 2012.

[23] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/produccion2.htm>, visitada el 13 de junio de 2012.

[24] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/produccion2.htm>, visitada el 13 de junio de 2012.

[25] El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Empresa Colombiana de petróleos, 2001, 189P.

[26] El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Empresa Colombiana de petróleos, 2001, pp. 190-191.

[27] <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?conID=42585&catID=358>, visitada el 15 de Junio de 2012.

[28] El petróleo en Colombia, ISBN 958928723, Empresa Colombiana de petróleos, 2001, p.214.

[29] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/elpetroleoysumundo/refinacion.htm>,  
visitada el 17 de Junio de 2012

[30] Invias, Norma INV E-128-07, Determinación de la gravedad específica de los suelos.

[31] Djoenaidi., (1985) apud Bardet, 1997

[32] Invias, Norma INV E-125-07, Determinación del límite líquido de los suelos.

[33] Invias, Norma INV E-126-07, Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

[34] Invias, Norma INV E-127-07, Determinación de los factores de contracción de los suelos.

[35] BRAJA M.Das., Fundamentos de la ingeniería geotécnica

[36] [http://www.bdigital.unal.edu.co/5495/55/71737500.2011\\_18.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/5495/55/71737500.2011_18.pdf), Visitada 19 de junio de 2012.

## ANEXOS

### ANEXO A. Con respecto a la Gravedad Específica de los suelos

Con el fin de desarrollar el cálculo de la gravedad Específica de los suelos, se calibró el picnómetro Numero 1 del laboratorio de suelos, el cual fue utilizado durante el desarrollo de todo el proyecto.

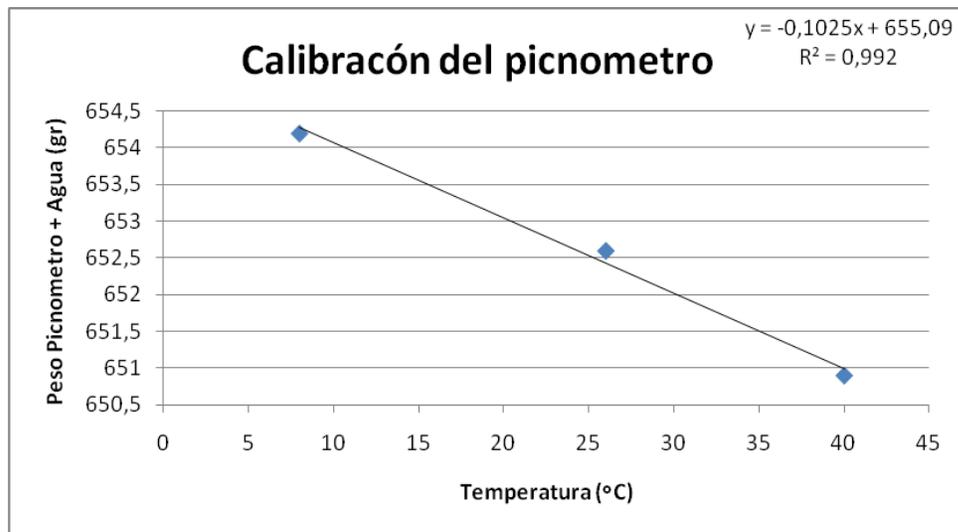


Figura de Calibración del Picnómetro

La calibración del picnómetro arrojó la ecuación de calibración:

$y = -0,1025x + 655,09$  Por medio de la cual reemplazando la temperatura en cada uno de los casos se obtuvo el peso del picnómetro + Agua (gr) en todos los ensayos de gravedad específica, posteriormente se realizaron los cálculos pertinentes al peso específico de los suelos orgánicos con sus diferentes porcentajes de contaminación por peso de crudo (5, 10, 15 y 30) a los dos tiempos estipulados (15 y 45 días).

A continuación se presenta la Tabla 20, como un ejemplo de los cálculos realizados en los ensayos de gravedad Específica de los suelos, dicho ejemplo pertenece a la muestra de suelo tipo (S1).

Tabla de Cálculos de gravedad Específica de los suelos para la muestra tipo (S1)

<b>PESO ESPECÍFICO RELATIVO</b>	
Matraz No	1
WMWS (gr)	694,6
Temperatura Co	24,5
WMW (gr)	652,57875
Capsula de evaporación No	1
Peso capsula + muestra seca	287,6
Peso capsula (gr)	187,5
WS (gr)	117
GS	100,1
<b>Peso específico</b>	<b>1,72</b>

## ANEXO B. Con respecto a la Determinación Límite líquido de los suelos

Para el cálculo del Límite líquido de los suelos, se realizó la gráfica correspondiente a Numero de Golpes versus contenido de Agua%, por medio de la cual se halló la ecuación lineal, posteriormente se reemplazó en (x) los 25 golpes, en los cuales es donde se encuentra el límite líquido de la muestra. La siguiente Tabla corresponde a la ecuación del límite líquido del suelo tipo (S1).

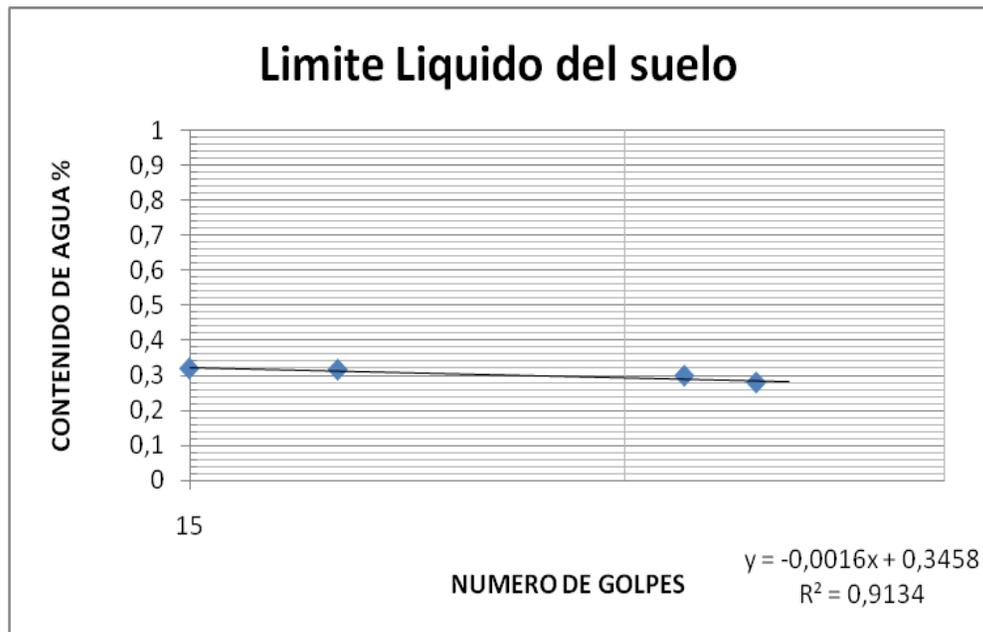


Figura de Límite líquido para la muestra de suelo tipo (S1).

La ecuación del Límite líquido para el suelo tipo (S1) es:

$$y = -0,0016x + 0,3458$$

Tabla de Cálculos del límite líquido de la muestra de suelo tipo (S1)

<b>LÍMITE LIQUIDO</b>										
<b>Prueba No</b>	<b>Capsula No</b>	<b>Numero de golpes</b>			<b>Peso capsula +suelo húmedo</b>	<b>Peso capsula+ suelo seco</b>	<b>Peso del agua</b>	<b>Peso de la capsula</b>	<b>Peso del suelo seco</b>	<b>Contenido de agua (W)</b>
---	---	---	---	---	gr	gr	gr	gr	gr	
1	6		33		17,26	14,9	2,36	7,01	7,89	29,91%
2	205		37		16,08	14,4	1,68	8,4	6	28,00%
3	177		19		14,31	12,5	1,81	6,77	5,73	31,59%
4	80		15		18,41	16,1	2,31	8,87	7,23	31,95%

**ANEXO C. Con respecto a la Determinación del Límite plástico de los suelos**

Tabla de Cálculos del Límite plástico de la muestra de suelo tipo (S3)

<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>							
<b>Prueba No</b>	<b>Capsula No</b>	<b>Peso capsula +suelo húmedo</b>	<b>Peso capsula +suelo seco</b>	<b>Peso del agua</b>	<b>Peso de la capsula</b>	<b>Peso del suelo seco</b>	<b>Contenido de agua (W)</b>
1	59	11	10,26	0,74	6,9	3,36	22,02%
2	75	10,2	9,59	0,61	7	2,59	23,55%
<b>LP=</b>		22,79%					

**ANEXO D. Con respecto a la Determinación de los factores de  
contracción**

A continuación se presenta el cálculo tipo del ensayo de contracción correspondiente a la muestra de suelo tipo (S3).

Tabla de Cálculo de los factores de contracción para la muestra de suelo tipo (S3)

<b>Capsul a No</b>	<b>Peso capsula + suelo hum</b>	<b>Peso capsula + suelo seco</b>	<b>Peso de la capsula</b>	<b>Peso del agua</b>	<b>Peso del suelo seco al horno</b>	<b>Contenido de agua</b>
-	gr	gr	gr	gr	(Wo)gr	(W)%
1	44,25	39,08	20,01	5,17	19,07	29,28%
4	47,86	42,66	23,36	5,2	19,3	29,30%

	<b>Capsula No</b>	<b>Peso mercurio + recipiente</b>	<b>Peso recipiente</b>	<b>Peso mercurio</b>	<b>Densidad Mercurio</b>	<b>Volumen mercurio</b>	
	-	gr	gr	gr	gr/cm3	cm3	
Capsula	1	210,28	19,94	190,34	13,53	V	14,067997
	4	214	23,32	190,68	13,53	V	14,093126
Muestra seca	1			150,37	13,53	Vo	11,113821
	4			153,05	13,53	Vo	11,311899

<b>Capsula No</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
Límite de contracción Ws%	13,7873463	14,89157569
Relación de contracción SR	1,7158815	1,706167919

### ANEXO E. Con respecto a la Permeabilidad de los suelos

A continuación se presentan los cálculos correspondientes al ensayo de permeabilidad de los suelos para la muestra tipo (S6).

Tabla de Cálculos de la permeabilidad de los suelos para la muestra tipo (S6)

Diámetro	6,35
H	2,56
Área	31,66921741
Peso de suelo	133,69

Diámetro tubería	0,92
Radio tubería	0,46
Área de la tubería	0,664761

<b>Área pipeta (cm2)</b>	2,659
<b>Diámetro</b>	0,91

Ensayo No	h1 (cm)	h2 (cm)	t (seg)	Q.final (cm3)	T °C	delta h	nt/n20	a	Kt	K20
1	70	69,9	1800	0,0664761	24	0,1	0,909	0,66476	4,26784E-08	3,88245E-08

2	70	69,8	1800	0,1329522 01	24	0,2	0,909	0,66476	8,54179E-08	7,77046E- 08
3	70	69,9	1800	0,0664761	24	0,1	0,909	0,66476	4,26784E-08	3,88245E- 08
4	70	69,9	1800	0,0664761	24	0,1	0,909	0,66476	4,26784E-08	3,88245E- 08
<b>Promedio</b>	70	69,875	1800	0,0830951	24	0,125	0,909	0,66476	5,33633E-08	4,85446E- 08

<b><math>n_T/n_{20}</math></b>	0,9097
<b><math>K_T</math></b>	5,34E-08
<b><math>K_{20}</math></b>	4,85E-08

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

A continuación se presentan los cálculos correspondientes al ensayo de 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 tipo (S6).

s (Kg/cm <sup>2</sup> )=	0,5
--------------------------	-----

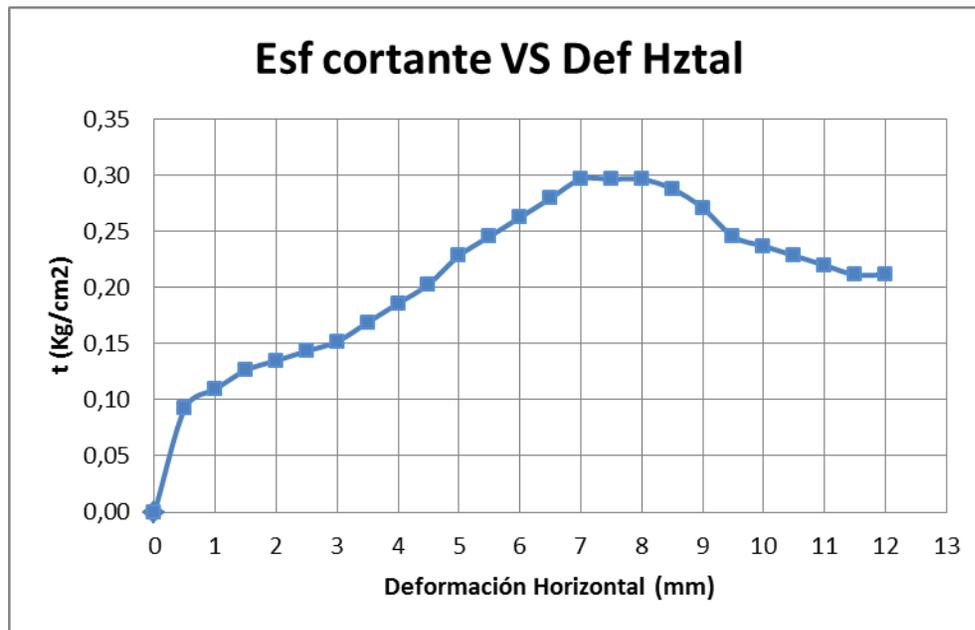
Vel (mm/min)=	1	t <sub>max</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )=	0,30
---------------	---	---	------

AREA MUESTRA (cm <sup>2</sup> )=	36	Cápsula No	131
Peso muestra +molde (g)=	242,7	Peso cápsula (g)=	6,87
Peso molde (g)=	137,8	Peso cápsula + suelo húmedo (g)=	35,39
Altura muestra (cm)=	1,97	Peso cápsula + suelo seco (g)=	31,63

Humedad (%)=	15,2
g (g/cm <sup>3</sup> )=	1,48
g <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )=	1,28

TIEMPO (min)	Lectura de Carga	Def Horizontal (mm)	Def Vertical 2*10 <sup>-3</sup> (mm)	P (Kg)	t (Kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0,0	0	0	0,00
0,5	4	0,5	-54	3,33	0,09
1,0	6	1,0	-88	3,94	0,11
1,5	8	1,5	-98	4,55	0,13
2,0	9	2,0	-114	4,86	0,13
2,5	10	2,5	-140	5,17	0,14

3,0	11	3,0	-164	5,47	0,15
3,5	13	3,5	-196	6,08	0,17
4,0	15	4,0	-216	6,70	0,19
4,5	17	4,5	-224	7,31	0,20
5,0	20	5,0	-224	8,23	0,23
5,5	22	5,5	-224	8,84	0,25
6,0	24	6,0	-216	9,45	0,26
6,5	26	6,5	-188	10,06	0,28
7,0	28	7,0	-130	10,68	0,30
7,5	28	7,5	-50	10,68	0,30
8,0	28	8,0	40	10,68	0,30
8,5	27	8,5	134	10,37	0,29
9,0	25	9,0	250	9,76	0,27
9,5	22	9,5	350	8,84	0,25
10,0	21	10,0	450	8,53	0,24
10,5	20	10,5	520	8,23	0,23
11,0	19	11,0	580	7,92	0,22
11,5	18	11,5	638	7,62	0,21
12,0	18	12,0	690	7,62	0,21



s (Kg/cm<sup>2</sup>)= 1

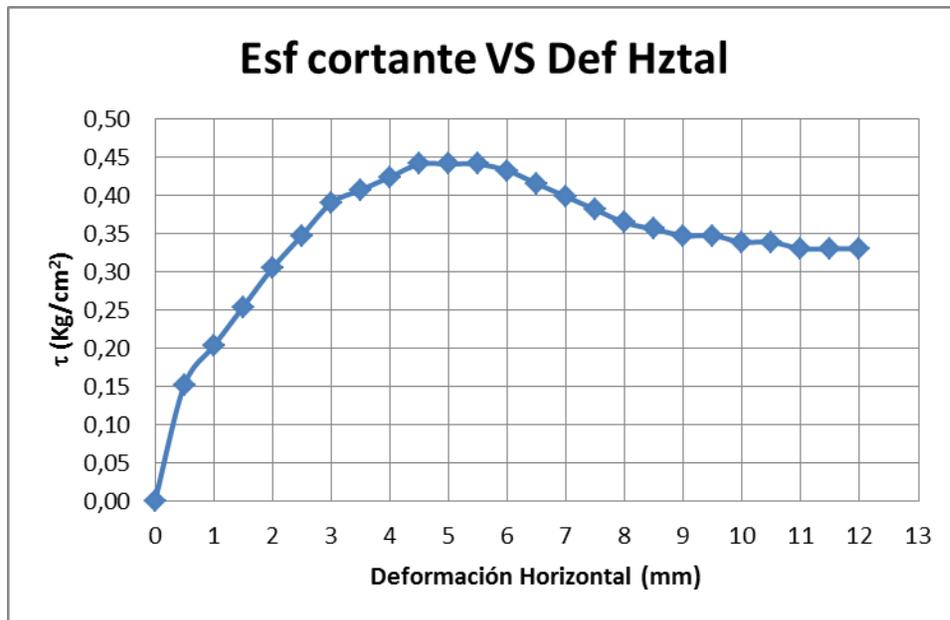
Vel (mm/min)= 1

t<sub>max</sub>(Kg/cm<sup>2</sup>)= 0,44

AREA MUESTRA (cm <sup>2</sup> )=	36	Cápsula No	13
Peso muestra +molde (g)=	262,4 9	Peso cápsula (g)=	6,61
Peso molde (g)=	148,2 3	Peso cápsula + suelo húmedo (g)=	41,8 7
Altura muestra (cm)=	2,05	Peso cápsula + suelo seco (g)=	37,3 6

Humedad (%)=	14,67
g (g/cm <sup>3</sup> )=	1,55
g <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )=	1,35

TIEMP O (min)	Lectura de Carga	Def Horizontal (mm)	Def Vertical $2 \cdot 10^{-3}$ (mm)	P (Kg)	t (Kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0,0	0	0	0,00
0,5	11	0,5	-120	5,47	0,15
1,0	17	1,0	-196	7,31	0,20
1,5	23	1,5	-242	9,15	0,25
2,0	29	2,0	-278	10,98	0,31
2,5	34	2,5	-294	12,51	0,35
3,0	39	3,0	-300	14,04	0,39
3,5	41	3,5	-300	14,66	0,41
4,0	43	4,0	-300	15,27	0,42
4,5	45	4,5	-292	15,88	0,44
5,0	45	5,0	-264	15,88	0,44
5,5	45	5,5	-240	15,88	0,44
6,0	44	6,0	-214	15,58	0,43
6,5	42	6,5	-180	14,96	0,42
7,0	40	7,0	-144	14,35	0,40
7,5	38	7,5	-112	13,74	0,38
8,0	36	8,0	-86	13,13	0,36
8,5	35	8,5	-64	12,82	0,36
9,0	34	9,0	-48	12,51	0,35
9,5	34	9,5	-30	12,51	0,35
10,0	33	10,0	-14	12,21	0,34
10,5	33	10,5	10	12,21	0,34
11,0	32	11,0	20	11,90	0,33
11,5	32	11,5	38	11,90	0,33
12,0	32	12,0	43	11,90	0,33



s (Kg/cm<sup>2</sup>)= 2

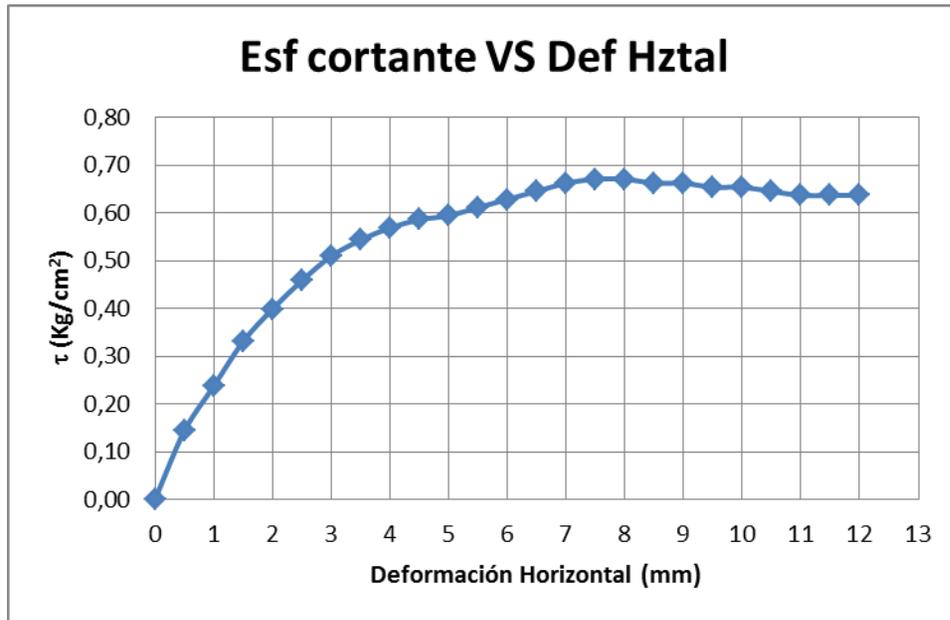
Vel (mm/min)= 1      t<sub>max</sub>(Kg/cm<sup>2</sup>)= 0,67

AREA MUESTRA (cm <sup>2</sup> )=	36	Cápsula No	62
Peso muestra +molde (g)=	257,4 2	Peso cápsula (g)=	7
Peso molde (g)=	150,6 9	Peso cápsula + suelo húmedo (g)=	39,4 3
Altura muestra (cm)=	1,92	Peso cápsula + suelo seco (g)=	35,2 8

Humedad (%)=	14,7
g (g/cm <sup>3</sup> )=	1,54
g <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )=	1,35

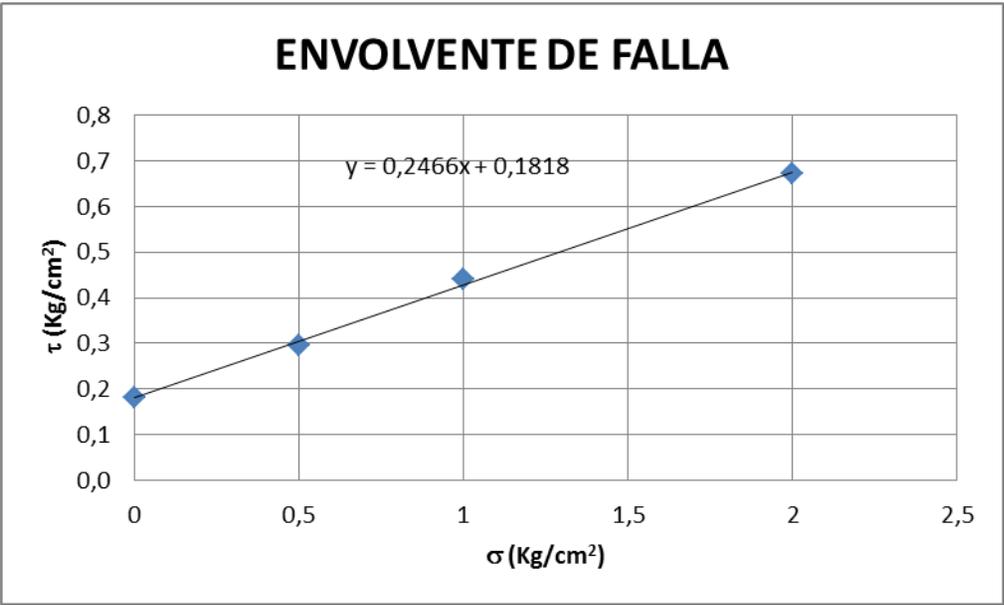
TIEMPO	Lectura de	Def Horizontal	Def Vertical	P	t
--------	------------	----------------	--------------	---	---

(min)	Carga	(mm)	$2 \cdot 10^{-3}$ (mm)	(Kg)	(Kg/cm <sup>2</sup> )
0,0	0	0,0	0	0	0,00
0,5	10	0,5	-102	5,17	0,14
1,0	21	1,0	-208	8,53	0,24
1,5	32	1,5	-280	11,90	0,33
2,0	40	2,0	-352	14,35	0,40
2,5	47	2,5	-408	16,49	0,46
3,0	53	3,0	-430	18,33	0,51
3,5	57	3,5	-490	19,56	0,54
4,0	60	4,0	-530	20,47	0,57
4,5	62	4,5	-550	21,09	0,59
5,0	63	5,0	-590	21,39	0,59
5,5	65	5,5	-618	22,01	0,61
6,0	67	6,0	-630	22,62	0,63
6,5	69	6,5	-642	23,23	0,65
7,0	71	7,0	-662	23,84	0,66
7,5	72	7,5	-658	24,15	0,67
8,0	72	8,0	-650	24,15	0,67
8,5	71	8,5	-642	23,84	0,66
9,0	71	9,0	-634	23,84	0,66
9,5	70	9,5	-620	23,54	0,65
10,0	70	10,0	-598	23,54	0,65
10,5	69	10,5	-596	23,23	0,65
11,0	68	11,0	-584	22,92	0,64
11,5	68	11,5	-574	22,92	0,64
12,0	68	12,0	-568	22,92	0,64



<b>s (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>t<sub>max</sub>(Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>g (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>g<sub>d</sub>(g/cm<sup>3</sup>)</b>
0,5	0,30	15,19	1,48	1,28
1	0,44	14,67	1,55	1,35
2	0,67	14,67	1,54	1,35

0	0,1818
0,5	0,30
1	0,44
2	0,67



<b>f (°)=</b>	13,85
<b>c (Kg/cm2)=</b>	0,1818

**ANEXO G. Con respecto a la Consolidación unidimensional de los suelos**

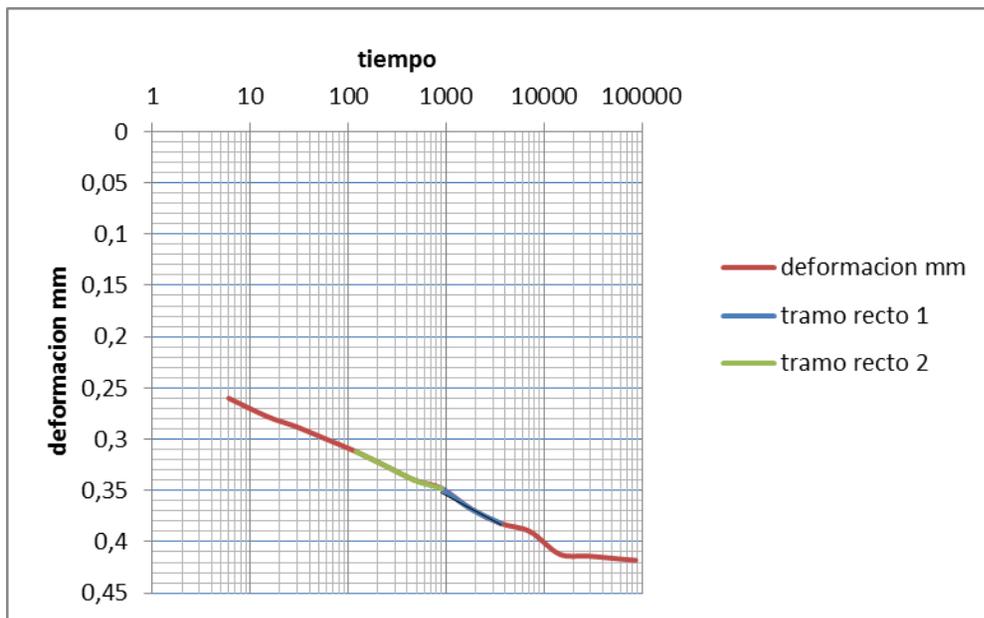
A continuación se presentan los cálculos correspondientes al ensayo de consolidación unidimensional, correspondiente a la muestra de suelo tipo (S6).

Tabla de cálculos de Consolidación unidimensional, correspondiente a la muestra de suelo tipo (S6).

<b>Datos generales</b>	<b>valor</b>	
capsula #	13	
peso molde	6,61	
peso molde + material	42,18	
peso molde + material seco	38,27	
peso agua	3,91	
peso material seco	31,66	
contenido de humedad	12,35%	
diámetro de la muestra	6,34	
área de la muestra	31,56	
altura inicial de la muestra	2,6	
volumen inicial de la muestra	82,056	
	inicial	final
Pm humedad + anillo	222,51	213,46
pm seca + anillo		198,12
peso anillo		90,14

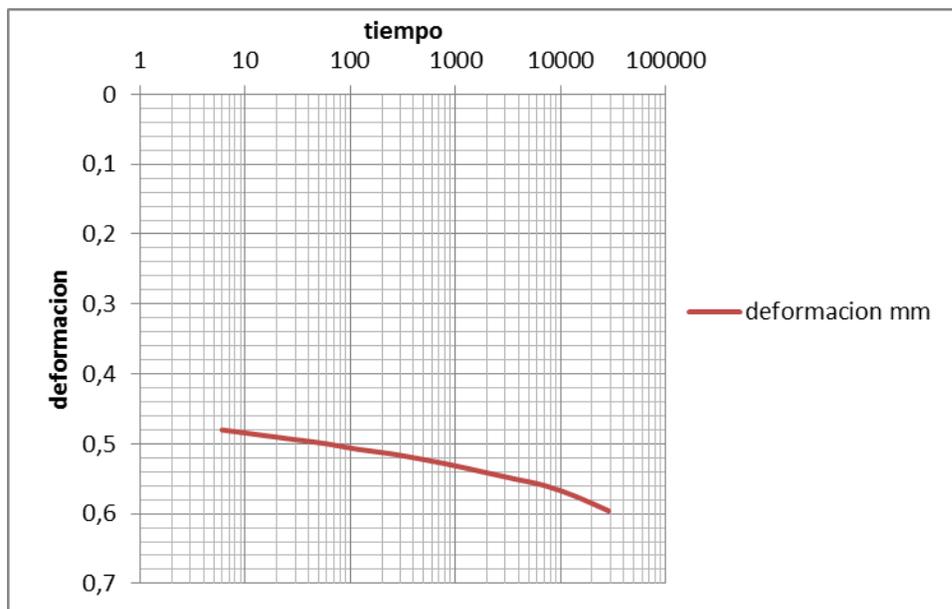
**Carga 0,5 kg/cm<sup>2</sup>**

tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación (mm)
6	130	0,26
15	139	0,278
30	144	0,288
60	150	0,3
120	156	0,312
240	163	0,326
480	170	0,34
900	174	0,348
1800	184	0,368
3600	191	0,382
7200	195	0,39
14400	206	0,412
28800	207	0,414
86400	209	0,418



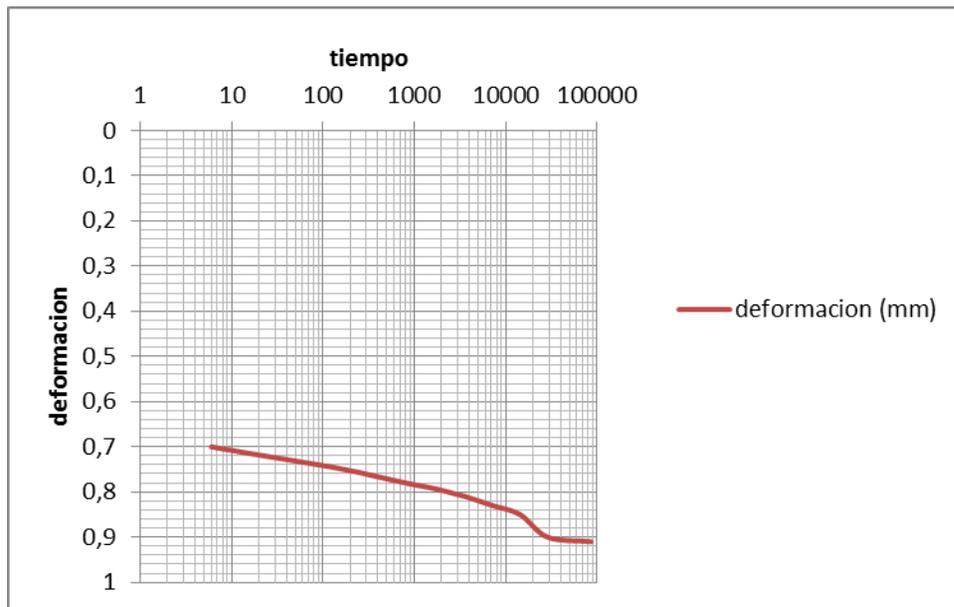
### Carga 1 kg/cm<sup>2</sup>

Tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación (mm)
6	240	0,48
15	244	0,488
30	247	0,494
60	250	0,5
120	254	0,508
240	257	0,514
480	261	0,522
900	265	0,53
1800	270	0,54
3600	275	0,55
7200	280	0,56
14400	288	0,576
28800	298	0,596



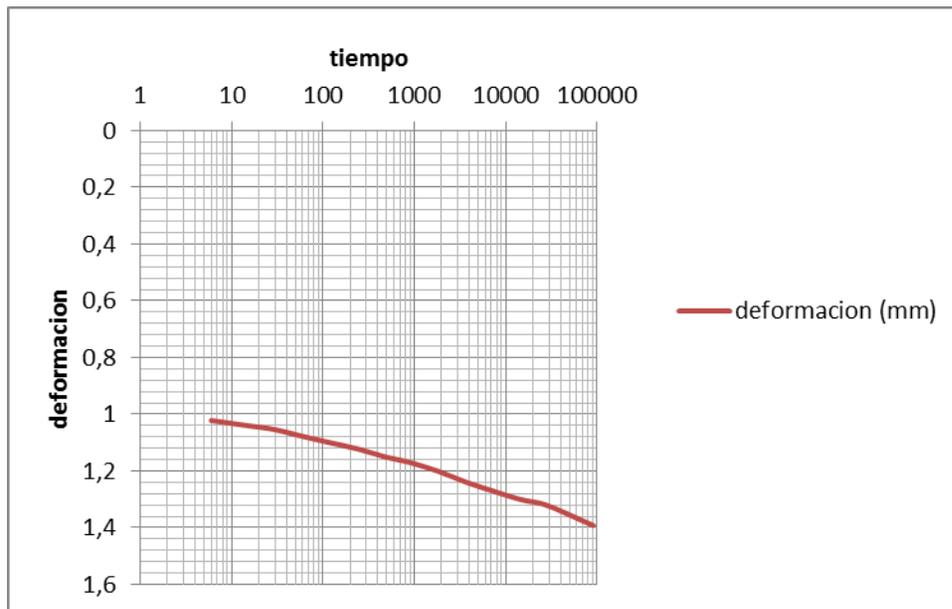
### Carga 2 kg/cm<sup>2</sup>

tiempo (seg)	lectura deformímetro	deformación (mm)
6	350	0,7
15	357	0,714
30	362	0,724
60	367	0,734
120	372	0,744
240	378	0,756
480	385	0,77
900	391	0,782
1800	397	0,794
3600	405	0,81
7200	415	0,83
14400	425	0,85
28800	450	0,9
86400	455	0,91



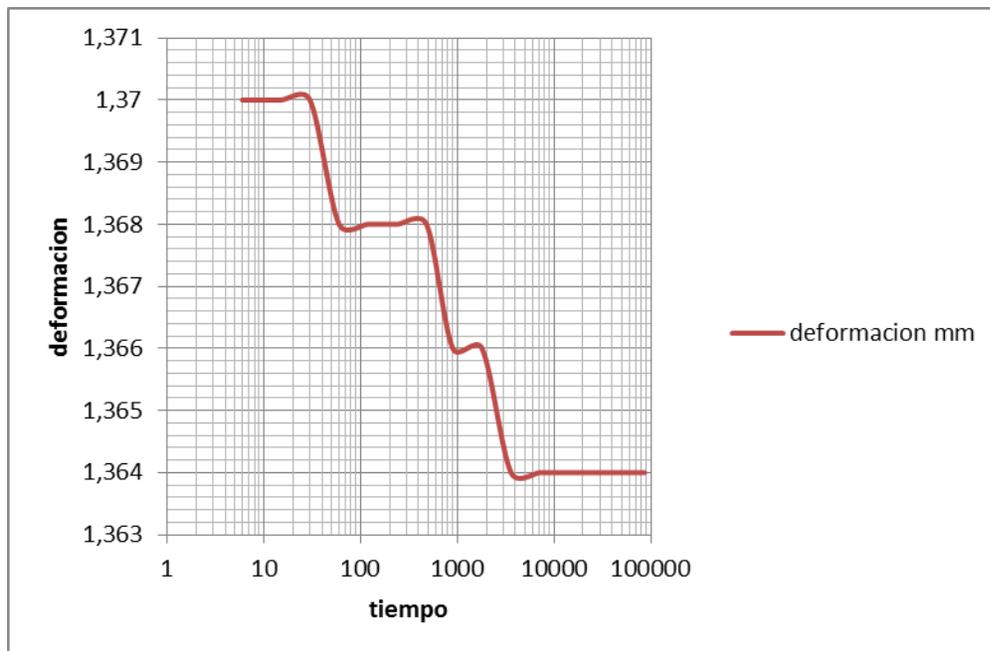
**Carga 4 kg/cm<sup>2</sup>**

tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación (mm)
6	511	1,022
15	520	1,04
30	527	1,054
60	539	1,078
120	550	1,1
240	561	1,122
480	575	1,15
900	585	1,17
1800	600	1,2
3600	619	1,238
7200	635	1,27
14400	650	1,3
28800	661	1,322
91224	696	1,392



### Descarga 4-2 kg/cm<sup>2</sup>

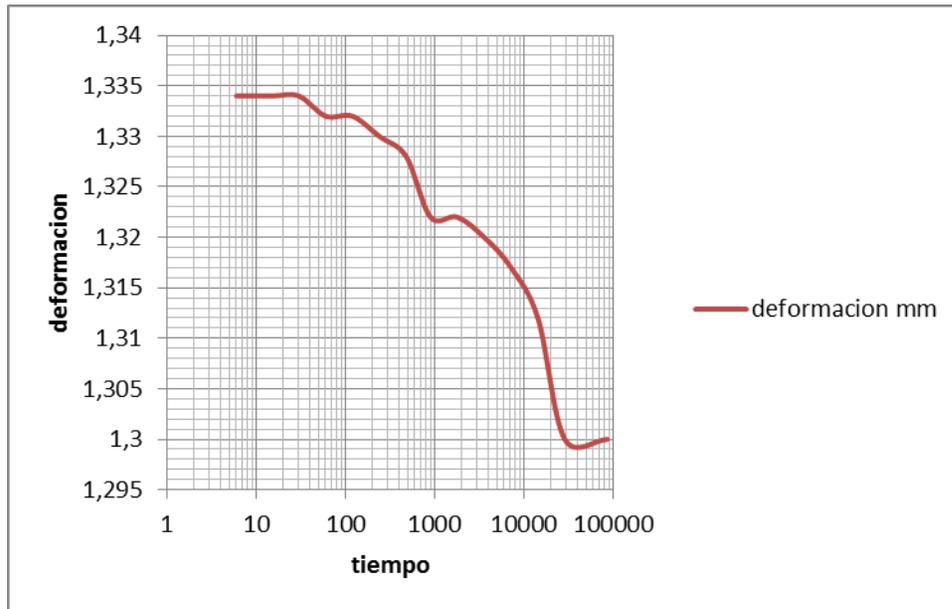
tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación mm
6	685	1,37
15	685	1,37
30	685	1,37
60	684	1,368
120	684	1,368
240	684	1,368
480	684	1,368
900	683	1,366
1800	683	1,366
3600	682	1,364
7200	682	1,364
14400	682	1,364
28800	682	1,364
86400	682	1,364



### Descarga 2-1 kg/cm<sup>2</sup>

tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación mm
6	667	1,334
15	667	1,334
30	667	1,334
60	666	1,332
120	666	1,332
240	665	1,33
480	664	1,328
900	661	1,322
1800	661	1,322
3600	660	1,32
7200	658,5	1,317

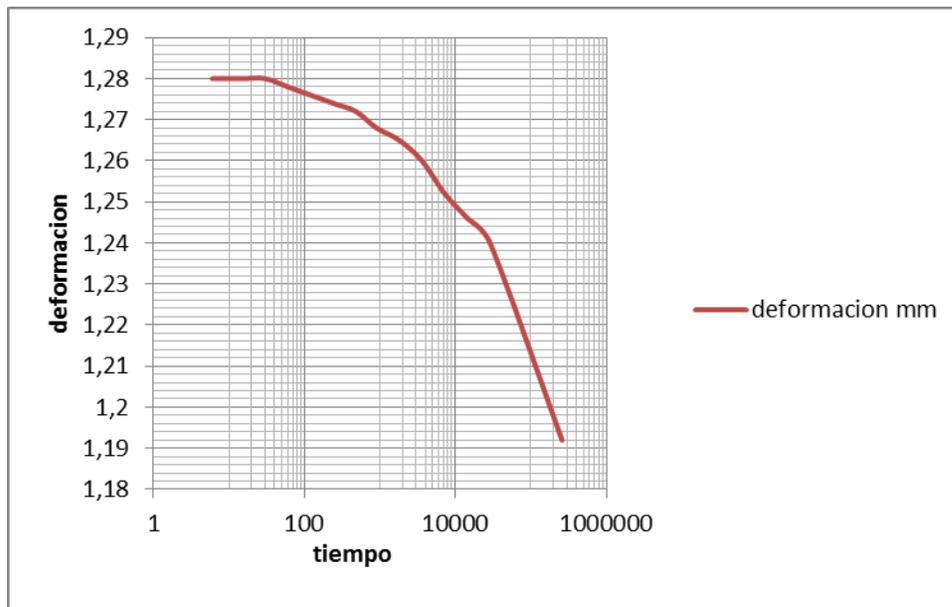
14400	656	1,312
28800	650	1,3
86400	650	1,3



### Descarga 1 - 0,5 kg/cm<sup>2</sup>

tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación mm
6	640	1,28
15	640	1,28
30	640	1,28
60	639	1,278
120	638	1,276
240	637	1,274
480	636	1,272

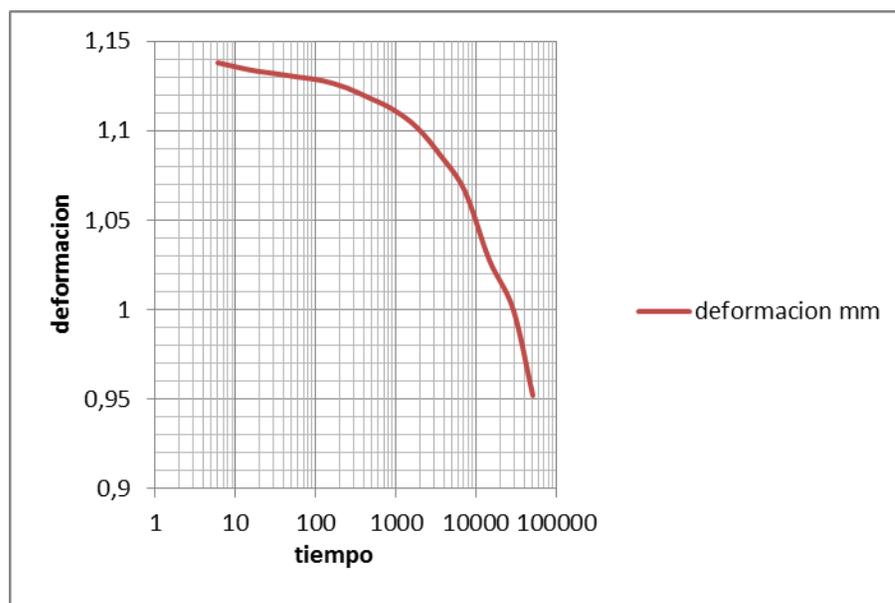
900	634	1,268
1800	632,5	1,265
3600	630	1,26
7200	626	1,252
14400	623	1,246
28800	620	1,24
259200	596	1,192



### Descarga 0,5 - 0 kg/cm 2

tiempo (seg)	lectura deformimetro	deformación mm
6	569	1,138
15	567	1,134
30	566	1,132
60	565	1,13
120	564	1,128
240	562	1,124

480	559	1,118
900	556	1,112
1800	551	1,102
3600	543	1,086
7200	533	1,066
14400	514	1,028
28800	500	1
50400	476	0,952

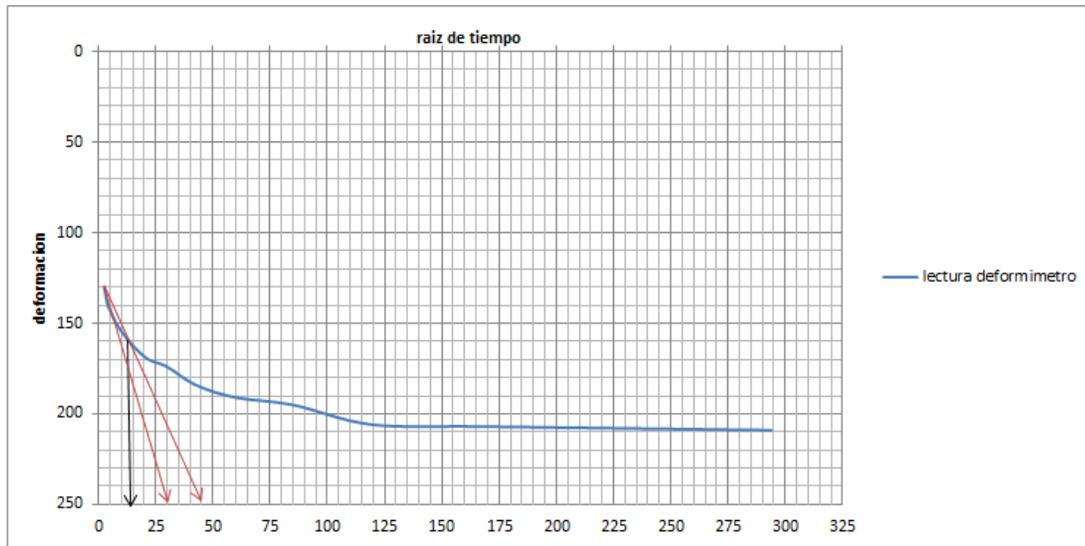


Cálculos	Resultados
humedad final	22,5875162
altura inicial muestra $H_0$	2,6
asentamiento al final $\Delta H$	2,4608
altura de sólidos $H_s$	0,06765932
Relación de vacíos inicial $e_0$	37,42782
$H_f$	0,1392
relación vacíos final $e_f$	1,05736636

grado de saturación inicial $S_o$	195,702754
grado de saturación final $S_f$	3,47729436

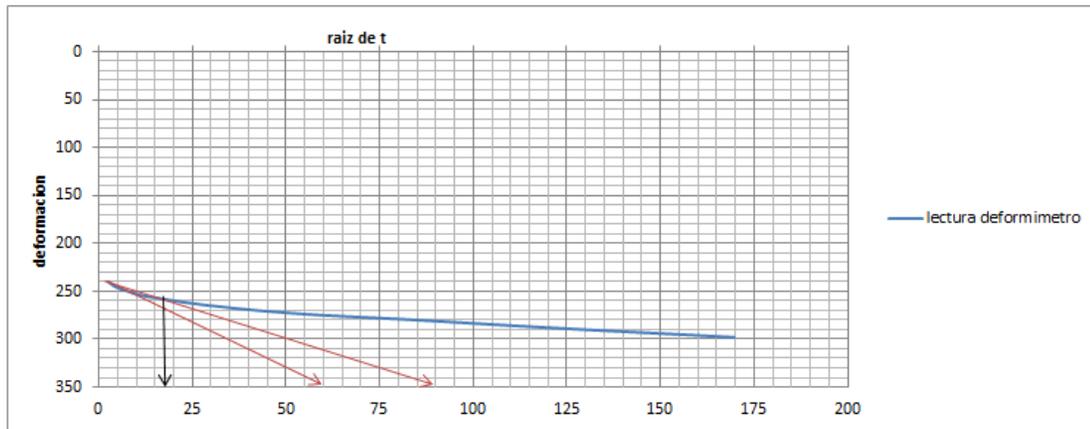
<b>carga 0,5 kg/cm<sup>2</sup></b>	t <sub>90</sub>	12,5
------------------------------------	-----------------	------

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformimetro
6	2,44949	130
15	3,872983	139
30	5,477226	144
60	7,745967	150
120	10,95445	156
240	15,49193	163
480	21,9089	170
900	30	174
1800	42,42641	184
3600	60	191
7200	84,85281	195
14400	120	206
28800	169,7056	207
86400	293,9388	209



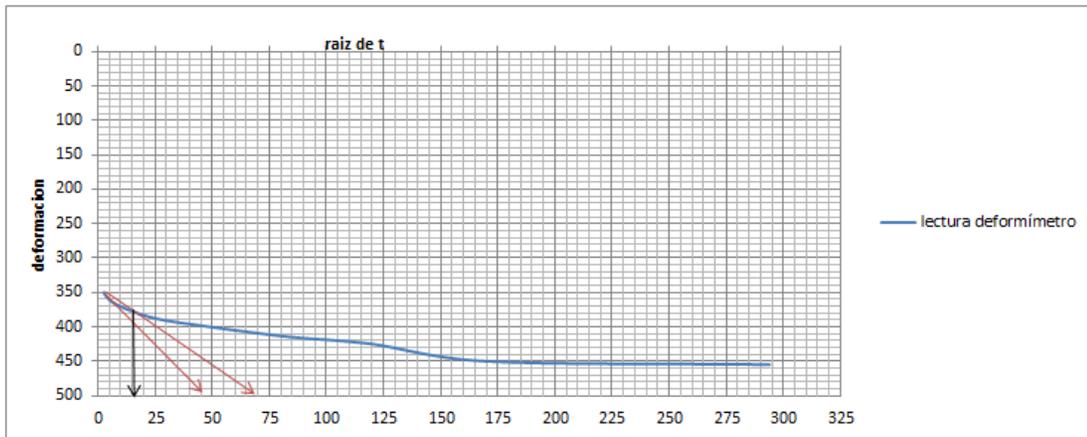
<b>Carga 1 kg/cm2</b>	t90	17,5
-----------------------	-----	------

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformimetro
6	2,449489743	240
15	3,872983346	244
30	5,477225575	247
60	7,745966692	250
120	10,95445115	254
240	15,49193338	257
480	21,9089023	261
900	30	265
1800	42,42640687	270
3600	60	275
7200	84,85281374	280
14400	120	288
28800	169,7056275	298



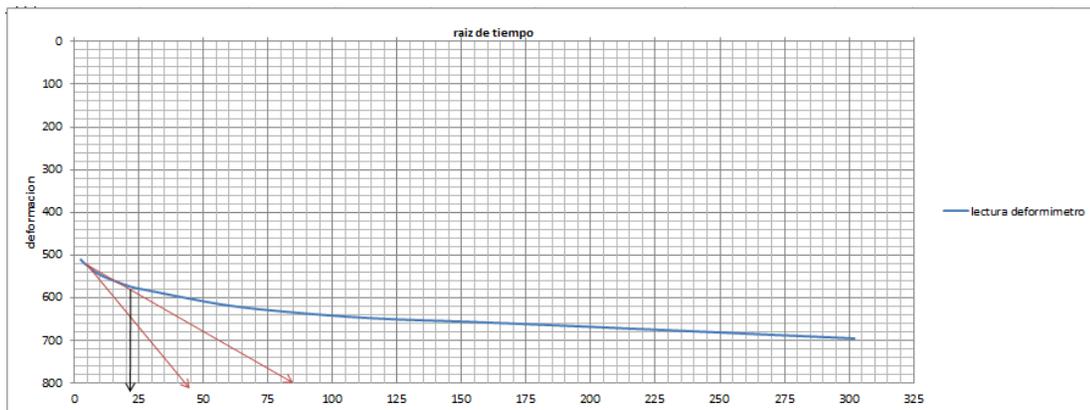
<b>carga 2 kg/cm2</b>	t90	15
-----------------------	-----	----

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformímetro
6	2,449489743	350
15	3,872983346	357
30	5,477225575	362
60	7,745966692	367
120	10,95445115	372
240	15,49193338	378
480	21,9089023	385
900	30	391
1800	42,42640687	397
3600	60	405
7200	84,85281374	415
14400	120	425
28800	169,7056275	450
86400	293,9387691	455



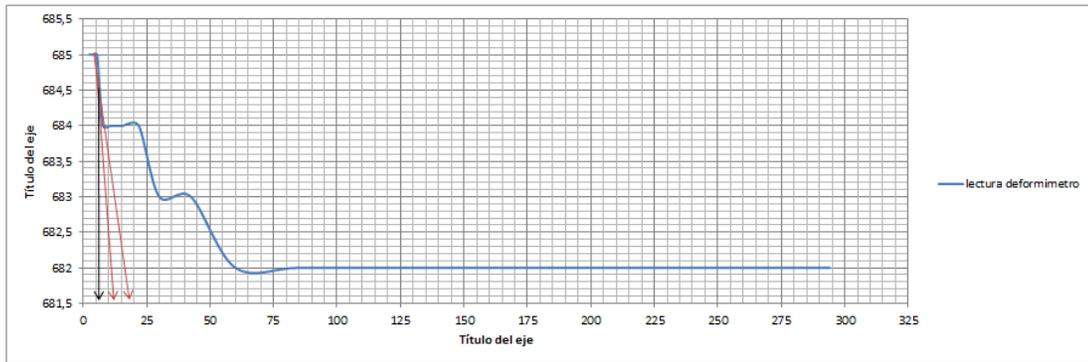
<b>Carga 4 kg/cm 2</b>	t90	22
------------------------	-----	----

tiempo	raíz de t	lectura deformímetro
6	2,449489743	511
15	3,872983346	520
30	5,477225575	527
60	7,745966692	539
120	10,95445115	550
240	15,49193338	561
480	21,9089023	575
900	30	585
1800	42,42640687	600
3600	60	619
7200	84,85281374	635
14400	120	650
28800	169,7056275	661
91224	302,0331108	696



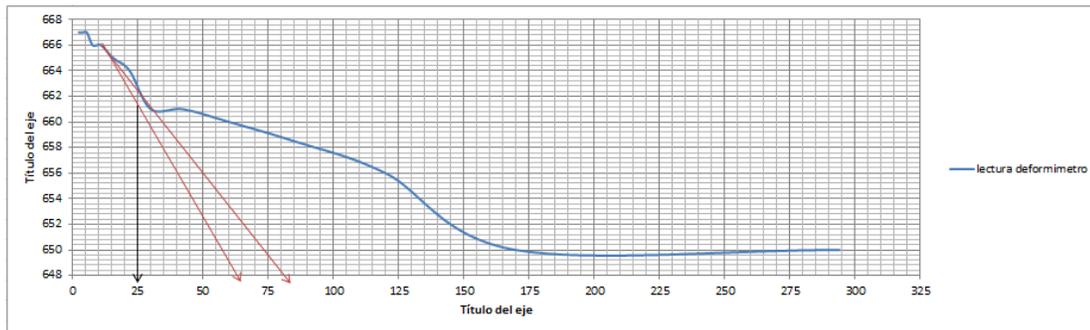
<b>Descarga 4-2 kg/cm 2</b>	t90	6
-----------------------------	-----	---

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformimetro
6	2,449489743	685
15	3,872983346	685
30	5,477225575	685
60	7,745966692	684
120	10,95445115	684
240	15,49193338	684
480	21,9089023	684
900	30	683
1800	42,42640687	683
3600	60	682
7200	84,85281374	682
14400	120	682
28800	169,7056275	682
86400	293,9387691	682



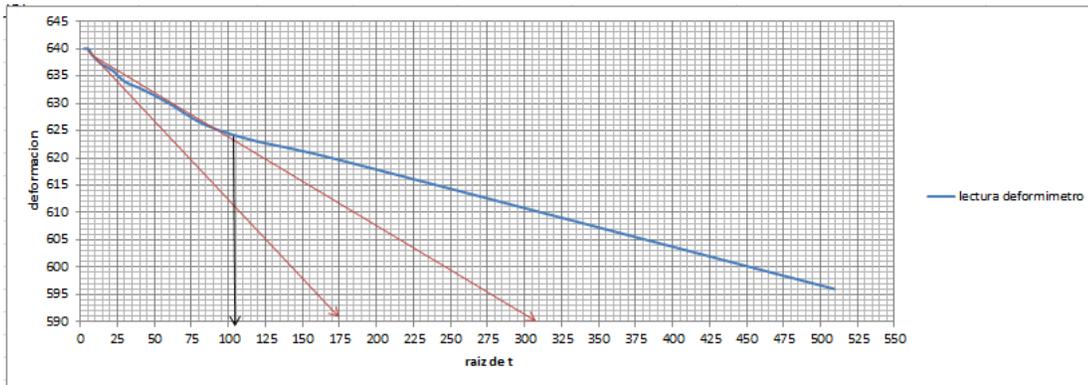
<b>Descarga 2-1 kg/cm2</b>	<b>t90</b>	<b>25</b>
----------------------------	------------	-----------

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformimetro
6	2,449489743	667
15	3,872983346	667
30	5,477225575	667
60	7,745966692	666
120	10,95445115	666
240	15,49193338	665
480	21,9089023	664
900	30	661
1800	42,42640687	661
3600	60	660
7200	84,85281374	658,5
14400	120	656
28800	169,7056275	650
86400	293,9387691	650



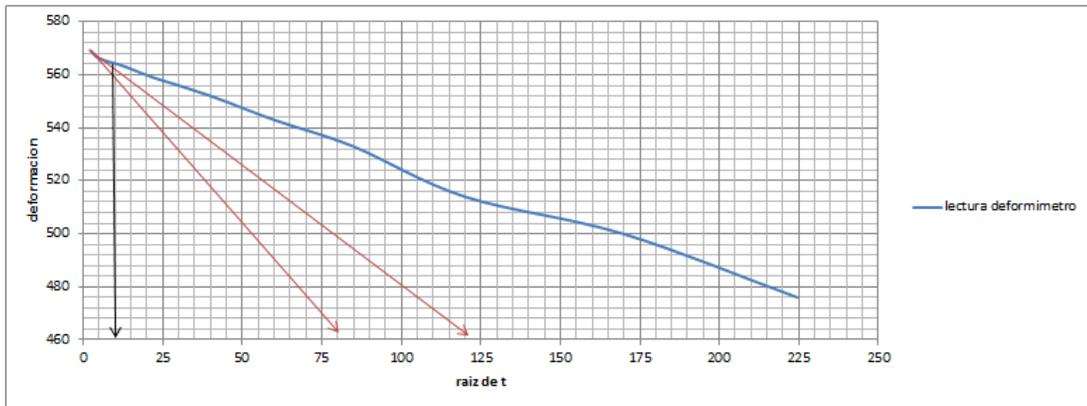
<b>Descarga 1 - 0,5 kg/cm 2</b>	t90	115
---------------------------------	-----	-----

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformimetro
6	2,449489743	640
15	3,872983346	640
30	5,477225575	640
60	7,745966692	639
120	10,95445115	638
240	15,49193338	637
480	21,9089023	636
900	30	634
1800	42,42640687	632,5
3600	60	630
7200	84,85281374	626
14400	120	623
28800	169,7056275	620
259200	509,1168825	596



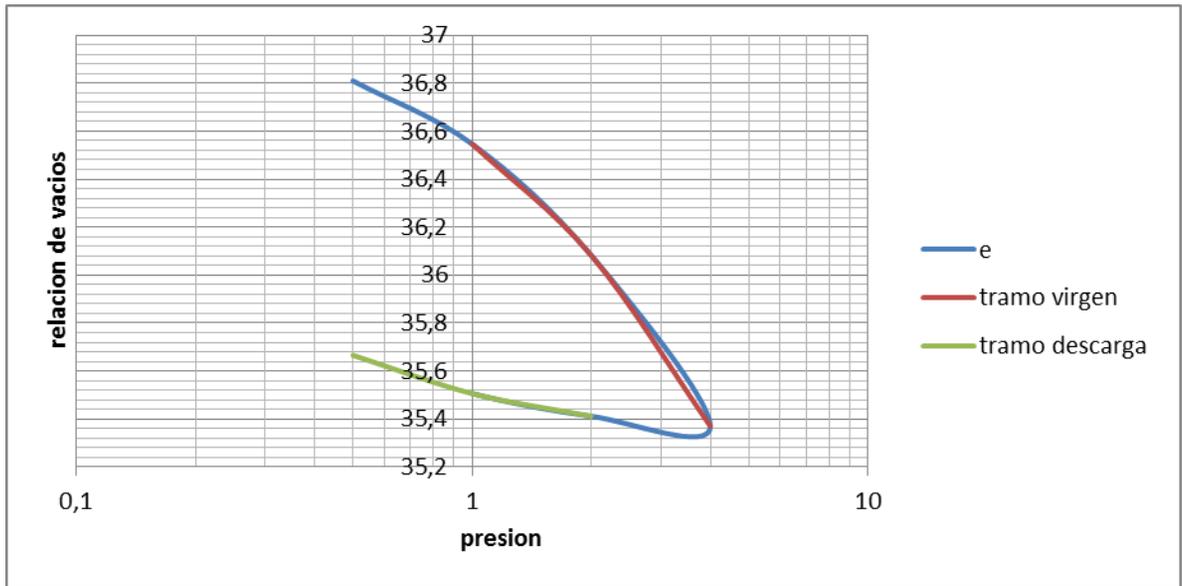
<b>Descarga 0,5 - 0 kg/cm 2</b>	t90	10
---------------------------------	-----	----

tiempo (seg)	raíz de t	lectura deformimetro
6	2,449489743	569
15	3,872983346	567
30	5,477225575	566
60	7,745966692	565
120	10,95445115	564
240	15,49193338	562
480	21,9089023	559
900	30	556
1800	42,42640687	551
3600	60	543
7200	84,85281374	533
14400	120	514
28800	169,7056275	500
50400	224,4994432	476



<b>t90</b>
12,5
17,5
15
22
6
25
115
10

<b>e para cada incremento de carga</b>					
<b>carga</b>	<b>deformación cm</b>	<b>presión kg/cm2</b>	<b>e</b>	<b>H promedio</b>	<b>Cv</b>
0.5 kg/cm2	0,0418	0,5	36,81001888	0,0418	0,0001185
1 kg/cm2	0,0596	1	36,54693611	0,0507	0,0001246
2 kg/cm2	0,091	2	36,08284629	0,0753	0,0003205
4 kg/cm2	0,1392	4	35,37045363	0,1151	0,0005107
de 4 a 2 kg/cm2	0,1364	2	35,41183743	0,1378	0,0026838
de 2 a 1 kg/cm2	0,13	1	35,50642899	0,1332	0,0006018
de 1 a 0,5 kg/cm2	0,1192	0,5	35,66605224	0,1246	0,0001145
de 0,5 a 0 kg/cm2	0,0952	0	36,02077058	0,1072	0,0009745



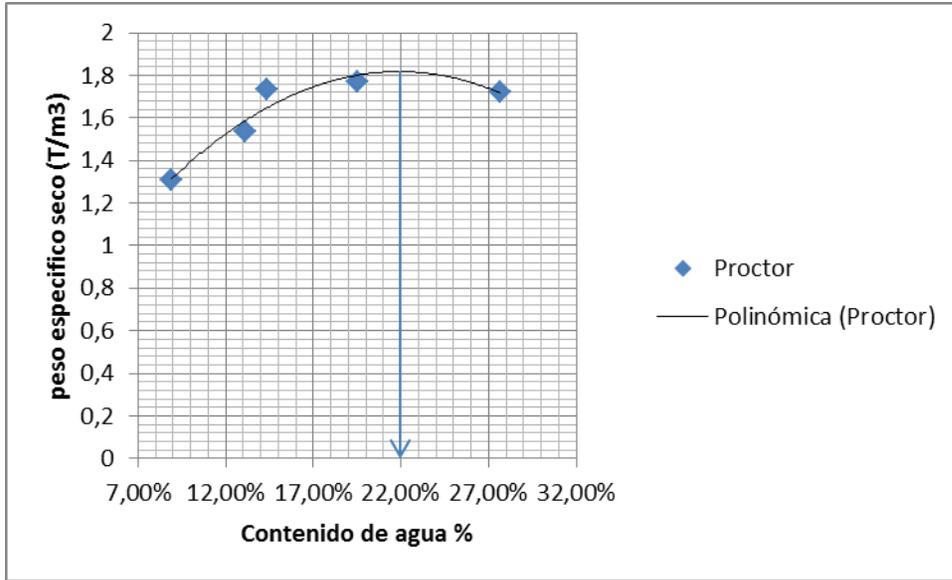
índice de compresión $C_c$	-1,954095116
índice de expansion $C_e$	-0,157113175
coeficiente de compresibilidad $a_v$	0,39216083

## **ANEXO H. Con respecto al Ensayo modificado de compactación**

Tabla de cálculos tipo correspondientes al ensayo modificado de compactación para suelo (S1)

<b>Molde No</b>	Nuevo
<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	2113,99
<b>Peso (gr)</b>	5270
<b>Peso Martillo (gr)</b>	1000
<b>Altura caída (cm)</b>	18
<b>No de capas</b>	5
<b>No de golpes por capa</b>	56
<b>Altura</b>	11,65
<b>Diámetro molde</b>	15,2

<b>Determinación No</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Peso molde + suelo húmedo (gr)</b>	8510	8990	9406	9486	9394
<b>Peso molde (gr)</b>	5740	5740	5740	5740	5740
<b>Peso suelo húmedo (gr)</b>	2770	3250	3666	3746	3654
<b>Peso específico húmedo (T/m3)</b>	1,310318	1,537377	1,734161	1,772005	1,728485
<b>Capsula No</b>	166	123	50	96	156
<b>Peso capsula + suelo húmedo (gr)</b>	31	22	38	38	31
<b>Peso capsula + suelo seco (gr)</b>	29,2	20,49	34,1	33,1	25,8
<b>Peso del agua (gr)</b>	1,8	1,51	3,9	4,9	5,2
<b>Peso capsula (gr)</b>	9	9	7	8	7
<b>Peso suelo seco (gr)</b>	20,2	11,49	27,1	25,1	18,8
<b>Contenido de agua (%)</b>	8,91%	13,14%	14,39%	19,52%	27,66%
<b>Peso específico seco (T/m3)</b>	1,309152	1,535359	1,731669	1,768552	1,723717



<b>Humedad Óptima</b>	<b>22%</b>
-----------------------	------------